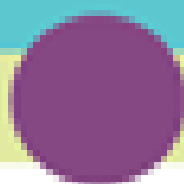


ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА СУСПІЛЬСТВО

INFORMATION TECHNOLOGY AND SOCIETY



ISSN 2786-5460 (Print)
ISSN 2786-5479 (Online)

МІЖРЕГІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ УПРАВЛІННЯ ПЕРСОНАЛОМ
INTERREGIONAL ACADEMY OF PERSONNEL MANAGEMENT



**НАУКОВІ ПРАЦІ
МІЖРЕГІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ
УПРАВЛІННЯ ПЕРСОНАЛОМ**

**ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ
ТА СУСПІЛЬСТВО**

**SCIENTIFIC WORKS
OF INTERREGIONAL ACADEMY
OF PERSONNEL MANAGEMENT**

**INFORMATION TECHNOLOGY
AND SOCIETY**

**Випуск 2 (8), 2023
Issue 2 (8), 2023**



**Видавничий дім
«Гельветика»
2023**

*Рекомендовано до друку Вченою радою
Міжрегіональної Академії управління персоналом
(протокол № 7 від 5 липня 2023 року)*

Інформаційні технології та суспільство / [головний редактор О. Попов]. – Київ : Міжрегіональна Академія управління персоналом, 2023. – Випуск 2 (8). – 98 с.

Журнал «Інформаційні технології та суспільство» є науковим рецензованим виданням, в якому здійснюється публікація матеріалів науковців різних рівнів у вигляді наукових статей з метою їх поширення як серед вітчизняних дослідників, так і за кордоном.

Редакційна колегія не обов'язково поділяє позицію, висловлену авторами у статтях, та не несе відповідальності за достовірність наведених даних і посилань.

Головний редактор: Попов О. О. – член-кор. НАН України, д-р техн. наук, професор, с.н.с., заступник директора з науково-організаційної роботи, Інститут геохімії навколишнього середовища Національної академії наук України.

Редакційна колегія:

Василенко М. Д. – д-р фіз.-мат. наук, проф., професор кафедри кібербезпеки, Національний університет «Одеська юридична академія»; **Горбов І. В.** – канд. техн. наук, с.н.с., старший науковий співробітник, Інститут проблем реєстрації інформації НАН України; **Дуднік А. С.** – д-р техн. наук, доц., доцент кафедри мережевих та інтернет технологій, Київський національний університет імені Тараса Шевченка; **Євсєєв С. П.** – д-р техн. наук, професор кафедри кібербезпеки та інформаційних технологій, Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця; **Зибін С. В.** – д-р техн. наук, доц., завідувач кафедри інженерії програмного забезпечення, Національний авіаційний університет; **Кавун С. В.** – д-р екон. наук, канд. техн. наук, проф., завідувач кафедри комп'ютерних інформаційних систем та технологій, Міжрегіональна Академія управління персоналом; **Комарова Л. О.** – д-р техн. наук, с.н.с., директор Навчально-наукового інституту інформаційної безпеки та стратегічних комунікацій, Національна академія Служби безпеки України; **Мілов О. В.** – д-р техн. наук, професор кафедри кібербезпеки та інформаційних технологій, Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця; **Охріменко Т. О.** – канд. техн. наук, старший науковий співробітник науково-дослідної лабораторії протидії кіберзагрозам в авіаційній галузі, Національний авіаційний університет; **Рудніченко М. Д.** – канд. техн. наук, доц., доцент кафедри інформаційних технологій, Державний університет «Одеська політехніка»; **Скуратовський Р. В.** – канд. фіз.-мат. наук, доц., доцент кафедри обчислювальної математики та комп'ютерного моделювання, Міжрегіональна Академія управління персоналом; **Супрун О. М.** – канд. фіз.-мат. наук, доц., доцент кафедри програмних систем і технологій, Київський національний університет імені Тараса Шевченка; **Табунщик Г. В.** – канд. техн. наук, проф., професор кафедри програмних засобів, Національний університет «Запорізька політехніка»; **Фомін О. О.** – д-р техн. наук, доц., професор кафедри комп'ютеризованих систем управління, професор кафедри прикладної математики та інформаційних технологій, Державний університет «Одеська політехніка»; **Хохлячова Ю. Є.** – канд. техн. наук, доц., доцент кафедри безпеки інформаційних технологій, Національний авіаційний університет; **Чолишкіна О. Г.** – канд. техн. наук, доц., директор Інституту комп'ютерно-інформаційних технологій та дизайну, Міжрегіональна Академія управління персоналом; **Чорний О. П.** – доктор технічних наук, професор, директор Навчально-наукового інституту електричної інженерії та інформаційних технологій, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського; **Юдін О. К.** – д-р техн. наук, проф., директор центру кібербезпеки Навчально-наукового інституту інформаційної безпеки та стратегічних комунікацій, Національна академія Служби безпеки України; **Гопєєнко Віктор** – dr. sc. ing., проф., проректор з наукової роботи, директор навчальної програми магістратури «Комп'ютерні системи», Університет прикладних наук ISMA (Латвійська Республіка); **Leszczyna Rafal** – dr hab. inż., професор кафедри комп'ютерних наук у менеджменті, Гданський технологічний університет (Республіка Польща).

*Свідомо про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації
«Інформаційні технології та суспільство» Серія КВ № 24815-14755Р від 27.04.2021 р.*

Відповідно до Наказу МОН України № 1290 від 30 листопада 2021 року (додаток 3) журнал включено до Переліку наукових фахових видань України (категорія Б) зі спеціальностей 121 – Інженерія програмного забезпечення, 122 – Комп'ютерні науки, 123 – Комп'ютерна інженерія, 124 – Системний аналіз, 125 – Кібербезпека, 126 – Інформаційні системи та технології.

Усі електронні версії статей журналу оприлюднюються на офіційній сторінці видання
<http://journals.maup.com.ua/index.php/it>

Статті у виданні перевірені на наявність плагіату за допомогою програмного забезпечення
StrikePlagiarism.com від польської компанії Plagiat.pl.

*Recommended for publication
by Interregional Academy of Personnel Management
(Minutes No. 7 dated 5 July 2023)*

Information Technology and Society / [chief editor Oleksandr Popov]. – Kyiv : Interregional Academy of Personnel Management, 2023. – Issue 2 (8). – 98 p.

Journal «Information Technology and Society» is a peer-reviewed scientific edition, which publishes materials of scientists of various levels in the form of scientific articles for the purpose of their dissemination both among domestic researchers and abroad.

Editorial board do not necessarily reflect the position expressed by the authors of articles, and are not responsible for the accuracy of the data and references.

Chief editor: Oleksandr Popov – Corresponding Member of NAS of Ukraine, Doctor of Engineering, Professor, Senior Research Scientist, Deputy Director for Scientific-Organizational Affairs, Institute of Environmental Geochemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine.

Editorial Board:

Mykola Vasylenko – Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Professor at the Department of Cybersecurity, National University «Odesa Law Academy»; **Ivan Horbov** – PhD in Engineering, Senior Research Associate, Senior Research Fellow, Institute for Information Recording of NAS of Ukraine; **Andrii Dudnik** – Doctor of Engineering, Associate Professor, Senior Lecturer at the Department of Networking and Internet Technologies, Taras Shevchenko National University of Kyiv; **Serhii Yevseiev** – Doctor of Engineering, Professor at the Department of Cybersecurity and Information Technologies, Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics; **Serhii Zybin** – Doctor of Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Software Engineering, National Aviation University; **Serhii Kavun** – Doctor of Economics, PhD in Engineering, Professor, Head of the Department of Computer Information Systems and Technologies Interregional Academy of Personnel Management; **Larysa Komarova** – Doctor of Engineering, Senior Research Scientist, Laureate of State Prize, Director of Educational-Scientific Institute of Information Security and Strategic Communications, National Academy of the Security Service of Ukraine; **Oleksandr Milov** – Doctor of Engineering, Professor at the Department of Cybersecurity and Information Technologies, Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics; **Tetiana Okhrimenko** – PhD in Engineering, Senior Research Scientist at the Scientific Research Laboratory for Countering Aviation Cyberthreats, National Aviation University; **Mykola Rudnichenko** – PhD in Engineering, Associate Professor, Senior Lecturer at the Department of Information Technologies, Odessa Polytechnic State University; **Ruslan Skuratovskiy** – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Senior Lecturer at the Department of Computational Mathematics and Computer Modeling, Interregional Academy of Personnel Management; **Olha Suprun** – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Senior Lecturer at the Department of Software Systems and Technologies, Taras Shevchenko National University of Kyiv; **Halyna Tabunshchik** – PhD in Engineering, Professor, Professor at the Department of Software Tools, “Zaporizhzhia Polytechnic” National university; **Oleksandr Fomin** – Doctor of Engineering, Associate Professor, Professor at the Department of Computerized Control Systems, Professor at the Department of Applied Mathematics and Information Technologies, Odessa Polytechnic State University; **Yuliia Khokhlachova** – PhD in Engineering, Associate Professor, Senior Lecturer at the Department of Information Technology Security, National Aviation University; **Olha Cholyshkina** – PhD in Engineering, Associate Professor, Director of the Institute of Computer Information Technologies and Design, Interregional Academy of Personnel Management; **Oleksii Chornyi** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of the Educational and Scientific Institute of Electrical Engineering and Information Technologies, Kremenchuk National University named after Mykhailo Ostrogradskyi; **Oleksandr Yudin** – Doctor of Engineering, Professor, Director of the Cybersecurity Center of the Educational-Scientific Institute of Information Security and Strategic Communications, National Academy of the Security Service of Ukraine; **Hopeienko Viktor** – dr. sc. ing., Professor, Vice Rector for Research, Director of the study programme “Computer systems”, ISMA University of Applied Sciences (Republic of Latvia); **Leszczyna Rafal** – dr hab. inż., Profesor, Katedra Informatyki w Zarządzaniu, Politechnika Gdańska (Republic of Poland).

*Print media registration certificate «Information Technology and Society»
series KV No. 24815-14755P dated 27.04.2021*

According to the Decree of MES No. 1290 (Annex 3) dated November 30, 2021, the journal was included in the List of scientific professional publications of Ukraine (category B) in specialties 121 – Software engineering, 122 – Computer sciences, 123 – Computer engineering, 124 – Systems analysis, 125 – Cybersecurity, 126 – Information systems and technologies.

All electronic versions of articles in the collection are available on the official website edition
<http://journals.maup.com.ua/index.php/it>

The articles were checked for plagiarism using the software
StrikePlagiarism.com developed by the Polish company Plagiat.pl.

© Interregional Academy of Personnel Management, 2023
© Copyright by the contributors, 2023

ЗМІСТ

Наталія БАРЧЕНКО, Володимир ЛЮБЧАК, Дмитро ВЕЛИКОДНИЙ ВИБІР МЕТОДА КЛАСТЕРИЗАЦІЇ З МЕТОЮ АНАЛІЗУ ПОКАЗНИКІВ ЦИФРОВИХ ТРАНСФОРМАЦІЙ РЕГІОНІВ УКРАЇНИ	6
Віктор БОЙКО, Микола ВАСИЛЕНКО, Валерія СЛАТВІНСЬКА ПРОГРАМУВАННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ СИСТЕМ ГЕНЕРАТИВНОГО ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ: РИЗИКИ ТА ВИКЛИКИ	18
Леонід ГАЛЬЧИНСЬКИЙ, Владислав ЛИЧИК МЕТРИКИ ОЦІНКИ КІБЕРВІДМОВСТІЙКОСТІ (АНАЛІТИЧНЕ ОГЛЯДОВЕ ДОСЛІДЖЕННЯ)	27
Ольга КОВАЛЬЧУК МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОЦІНЮВАННЯ МАКРОЕКОНОМІЧНИХ НАСЛІДКІВ ПРИПИНЕННЯ ЕКСПОРТУ РОСІЙСЬКОГО ГАЗУ У КРАЇНИ ЄС	34
Олена ЛЯШЕНКО, Станіслав ПОСЛАВСЬКИЙ, Дмитро КИРИЙЧУК, Віктор ПРАЧИК, Світлана БУНКУС РОЗРОБЛЕННЯ МОБІЛЬНОГО ДОДАТКУ ДЛЯ ВІДСТЕЖЕННЯ СТАНУ ЗДОРОВ'Я ТА ПЛАНУВАННЯ ХАРЧУВАННЯ МАЛОМОБІЛЬНИХ ГРУП НАСЕЛЕННЯ В УМОВАХ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ	42
Андрій НЕСТЕРУК, Богдан КОРНІЄНКО МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРІВ У ГРАНУЛЯТОРІ З ПСЕВДОЗРІДЖЕНИМ ШАРОМ	51
Євген РЕХЛЕЦЬКИЙ, Ірина АРТИЩУК, Марія КРУТЯК, Леся ХМІЛЯРЧУК УДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМУ ОБРОБКИ АСТРОНОМІЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДУ LUCKY IMAGING	62
Антон СИСОЄНКО, Віра БАБЕНКО, Світлана СИСОЄНКО ОСОБЛИВОСТІ РЕАЛІЗАЦІЇ ТА ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ОБФУСКАЦІЇ КОДУ (АНАЛІТИЧНЕ ОГЛЯДОВЕ ДОСЛІДЖЕННЯ)	69
Marian SLABINOHA, Taras MYKHAILOV USING EXPERT JUDGEMENT TECHNIQUES TO ESTIMATE IT PROJECTS COMPLETION TIME	79
Дарина ЧЕРНИШОВА ПОТРЕБА ЦИФРОВІЗАЦІЇ ПОЛІТИК ГЕНДЕРНОЇ РІВНОСТІ В ОСВІТНІЙ ДІЯЛЬНОСТІ	84
Tatyana CHILIKINA, Tatyana PARFONOVA, Nina RUDENKO OVERVIEW OF SOFTWARE FOR SOLVING OPTIMIZATION PROBLEMS	90

CONTENTS

Nataliia BARCHENKO, Volodymyr LIUBCHAK, Dmytro VELYKODNYI CHOICE OF CLUSTERIZATION METHOD FOR DIGITAL TRANSFORMATION INDICATORS ANALYSIS OF REGIONS OF UKRAINE	6
Viktor BOYKO, Nikolai VASILENKO, Valeriia SLATVINSKA PROGRAMMING WITH THE HELP OF GENERATIVE ARTIFICIAL INTELLIGENCE SYSTEMS: RISKS AND CHALLENGES	18
Leonid GALCHINSKYI, Vladyslav LYCHYK CYBER RESILIENCE ASSESSMENT METRICS (ANALYTICAL AND REVIEW RESEARCH)	27
Olha KOVALCHUK A MATHEMATICAL MODEL FOR ASSESSING THE MACROECONOMIC CONSEQUENCES OF THE CESSATION OF RUSSIAN GAS EXPORTS TO EU COUNTRIES	34
Olena LIASHENKO, Stanislav POSLAVSKYI, Dmytro KYRYICHUK, Viktor PRACHYK, Svitlana BUNKKUS DEVELOPMENT OF A MOBILE APPLICATION FOR HEALTH TRACKING AND MEAL PLANNING FOR PEOPLE WITH LIMITED MOBILITY IN EMERGENCY SITUATIONS	42
Andrii NESTERUK, Bogdan KORNIYENKO MATHEMATICAL MODEL OF THE PROCESS OF PRODUCTION OF MINERAL FERTILIZERS IN A FLUIDIZED BED GRANULATOR	51
Yevhen REHLETSKY, Iryna ARTYSHCHUK, Maria KRUTYAK, Lesya KHMILYARCHUK IMPROVING THE ASTRONOMICAL IMAGES PROCESSING ALGORITHM USING LUCKY IMAGING	62
Anton SYSOIENKO, Vira BABENKO, Svitlana SYSOIENKO FEATURES OF THE IMPLEMENTATION AND APPLICATION OF CODE OBFUSCATION METHODS (ANALYTICAL AND REVIEW RESEARCH)	69
Marian SLABINOHA, Taras MYKHAILOV USING EXPERT JUDGEMENT TECHNIQUES TO ESTIMATE IT PROJECTS COMPLETION TIME	79
Daryna CHERNYSHOVA THE ESSENCE AND STRUCTURE OF GENDER EQUALITY IN EDUCATIONAL ACTIVITIES	84
Tatyana CHILIKINA, Tatyana PARFONOVA, Nina RUDENKO OVERVIEW OF SOFTWARE FOR SOLVING OPTIMIZATION PROBLEMS	90

УДК 004

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.2.1>

Наталія БАРЧЕНКО

кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерних наук, Сумський державний університет, вул. Харківська, 116, м. Суми, Україна, індекс 40007 (n.barchenko@cs.sumdu.edu.ua)

ORCID: 0000-0002-5439-8750

Володимир ЛЮБЧАК

кандидат фізико-математичних наук, доцент, завідувач кафедри кібербезпеки, Сумський державний університет, вул. Харківська, 116, м. Суми, Україна, індекс 40007 (v.liubchak@dcs.sumdu.edu.ua)

ORCID: 0000-0002-7335-6716

Дмитро ВЕЛИКОДНИЙ

кандидат фізико-математичних наук, старший викладач кафедри комп'ютерних наук, Сумський державний університет, вул. Харківська, 116, м. Суми, Україна, індекс 40007 (d.velykodnyi@cs.sumdu.edu.ua)

ORCID: 0000-0003-0044-5619

Nataliia BARCHENKO

Candidate of Technical Science, Associate Professor of the Department of Computer Science, Sumy State University, Kharkivska str., 116, Sumy, Ukraine, postal code 40007 (n.barchenko@cs.sumdu.edu.ua)

Volodymyr LIUBCHAK

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Cyber Security, Sumy State University, Kharkivska str., 116, Sumy, Ukraine, postal code 40007 (v.liubchak@dcs.sumdu.edu.ua)

Dmytro VELYKODNYI

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Computer Science, Sumy State University, Kharkivska str., 116, Sumy, Ukraine, postal code 40007 (d.velykodnyi@cs.sumdu.edu.ua)

Бібліографічний опис статті: Барченко Н., Любчак В., Великодний Д. Вибір метода кластеризації з метою аналізу показників цифрових трансформацій регіонів України. *Інформаційні технології та суспільство*. 2023. Вип. 2(8). 6–17. DOI: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.2.1>

Bibliographic description of the article: Barchenko N., Liubchak V., Velykodnyi D. (2023). Vybir metoda klasteryzatsii z metoiu analizu pokaznykiv tsyfrovyykh transformatsii rehioniv Ukrainy [Choice of clusterization method for digital transformation indicators analysis of regions of Ukraine]. *Informatsiini tekhnolohii ta suspilstvo – Information technology and society*, 2(8), 6–17. DOI: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.2.1>

**ВИБІР МЕТОДА КЛАСТЕРИЗАЦІЇ З МЕТОЮ АНАЛІЗУ
ПОКАЗНИКІВ ЦИФРОВИХ ТРАНСФОРМАЦІЙ РЕГІОНІВ УКРАЇНИ¹**

В статті розглянуто актуальне питання щодо застосування кластерного аналізу для опису, обґрунтування трендів та показників узгодженості розвитку регіонів України в напрямі цифрових трансформацій. Для планів розбудови та визначення тенденцій потребується систематизація наявних знань щодо трендів та інструментів цифровізації регіональних систем. Для оцінки стану цифрових трансформацій регіонів потрібно залучати показники різного типу різних напрямів діяльності, як кількісні так і якісні, що формують базу багатовимірних даних для дослідження. Метою даної роботи є дослідження та застосування кластерного аналізу для опису, обґрунтування трендів та показників узгодженості розвитку регіонів України в напрямі цифрових трансформацій. Кластерний аналіз полягає у здійсненні класифікації об'єктів дослідження за допомогою численних обчислювальних процедур. Він дає можливість класифікувати об'єкти за декількома ознаками одночасно, перетворити великий обсяг різнобічної інформації в упорядкований, компактний вигляд. Розглянуто ієрархічний метод кластеризації та метод к-середніх. Проведені експерименти в SPSS Statistics дозволили обрати в якості метода для подальших досліджень метод к-середніх. Комп'ютерний експеримент з побудови системи кластерів проведено з використанням даних звіту Міністерства цифрової трансформації України – підсумкових показників (субіндексів) цифрової трансформації регіонів. Виділено п'ять кластерів, які можна поставити у відповідність рівням розвитку цифровізації областей. Порівняння цих результатів з інтегральними індексами цифрової трансформації регіонів, які визначені за іншою методикою, демонструє гарну узгодженість. Метод к-середніх планується обрати базовим для програмної реалізації підсистеми кластеризації системи підтримки прийняття рішень щодо аналізу цифрової трансформації регіонів.

Ключові слова: кластерний аналіз, цифровізація регіонів, SPSS.

¹ Публікація підготовлена у рамках виконання наукового проєкту 0122U001232 «Реструктуризація національної економіки в напрямі цифрових трансформацій для сталого розвитку», який фінансується Національним фондом досліджень України

CHOICE OF CLUSTERIZATION METHOD FOR DIGITAL TRANSFORMATION INDICATORS ANALYSIS OF REGIONS OF UKRAINE ²

The article deals with the topical issue of the application of cluster analysis for the description and substantiation of trends and indicators of consistency of the development of the regions of Ukraine in the direction of digital transformations. Systematization of available knowledge regarding trends and tools of digitization of regional systems is required for development plans and determination of trends. In order to assess the state of digital transformations of the regions, it is necessary to attract indicators of various types of different areas of activity, both quantitative and qualitative, forming a multidimensional data base for research. The purpose of this work is the research and application of cluster analysis for the description and substantiation of trends and indicators of consistency of the development of the regions of Ukraine in the direction of digital transformations. Cluster analysis consists in the classification of research objects using numerous computational procedures. It makes it possible to classify objects by several features at the same time, to transform a large volume of versatile information into an ordered, compact form. The hierarchical clustering method and the k-means method are considered. The experiments carried out in SPSS Statistics made it possible to choose the k-means method as a method for further research. A computer experiment on the construction of a system of clusters was conducted using the data of the report of the Ministry of Digital Transformation of Ukraine – the final indicators (sub-indices) of the digital transformation of regions. Five clusters have been identified, which can be matched to the levels of development of digitalization of regions. A comparison of these results with the integral indices of the digital transformation of regions, which are determined by a different methodology, shows a good consistency. The method of k-means is planned to be chosen as the basis for the software implementation of the clustering subsystem of the decision support system for the analysis of the digital transformation of regions.

Key words: cluster analysis, digitization of regions, SPSS.

Актуальність.

Для вирішення проблем післявоєнного відновлення України значна увага приділяється цифровому розвитку економіки та суспільства. Цифровий розвиток регіонів має на меті забезпечити економічне зростання та покращення рівня життя громадян, зробити державні послуги більш доступними та якісними.

Для планів розбудови та визначення тенденцій потребується систематизація наявних знань щодо трендів та інструментів цифровізації регіональних систем.

До показників цифровізації можна віднести такі фактори, як рівень цифровізації економіки; охоплення домогосподарств цифровою сферою; інтенсивність державної участі у цифровізації та інші [1]. Для оцінки стану цифрових трансформацій регіонів потрібно залучати показники різного типу різних напрямів діяльності, як кількісні так і якісні, що формують базу багатовимірних даних для дослідження.

України провело дослідження індексу цифрової трансформації регіонів та представило звіт за результатами 2022 року [2]. Запропонований індекс являє собою один з інструментів вимірювання процесів цифровізації в регіонах України, дозволяє дослідити спроможність органів влади впроваджувати цифрові рішення та оцінювати рівень цифрової культури населення держави.

Для проведення аналізу, визначення трендів цифровізації та подальшого планування розвитку регіонів потрібно виділити спільні групи/кластери, щоб для них формувати відповідні пакети суспільно-економічних рекомендацій.

Також потрібно спиратись на характеристики цифровізації регіонів за попередній період, не тільки за результатами 2022 р. Нажаль, відсутній такий комплекс регіональних показників цифровізації раніше 2021 р. Доступні лише точкові статистичні дані Державної служби статистики України [3] щодо охоплення послугами інтернет, дані досліджень наявності IT-фахівців та деякі інші.

Тому є актуальним опис стану цифровізації регіонів України з їх ранжуванням, за наявними не повними даними попереднього періоду часу, та узгодження з результатами дослідження Міністерство цифрової трансформації 2022 р [2]. Це, можливо, також дозволить удосконалити методику визначення індексу цифрової трансформації регіонів.

Постановка завдання.

Метою даної роботи є дослідження та застосування кластерного аналізу для опису, обґрунтування трендів та показників узгодженості розвитку регіонів України в напрямі цифрових трансформацій.

Кластерний аналіз полягає у здійсненні класифікації об'єктів дослідження за допомогою численних обчислювальних процедур. Він дає можливість класифікувати об'єкти за декількома ознаками одночасно, перетворити великий обсяг різнобічної інформації в упорядкований, компактний вигляд. Це сприяє підвищенню рівня зрозумілості та сприйняття результатів аналізу, а також створює підґрунтя для прогнозування.

² The publication was prepared in the framework of the research project 0122U001232 "Restructuring of the national economy in the direction of digital transformations for sustainable development", funded by the National Research Foundation of Ukraine

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні завдання:

- Провести огляд літературних джерел щодо показників оцінки рівня цифрової трансформації та методів кластеризації.
- Вибрати можливі методи кластеризації та алгоритми досліджень
- Провести комп'ютерні експерименти з визначеними методами на наявних даних цифрового розвитку регіонів.
- Вибрати метод кластеризації для використання та програмної реалізації в підсистемі кластерного аналізу.
- Підготувати рекомендації для майбутніх досліджень з визначення трендів розвитку регіонів та взаємного зв'язку показників цифровізації та соціально-економічних показників розвитку регіонів України

Інформаційно-аналітичний огляд.

Індекс цифрової трансформації регіонів [2] є одним з інструментів вимірювання процесів інформатизації та цифровізації у регіонах. Загалом індекс містить 8 субіндексів (у рамках яких відображується 31 індикатор та 76 показників):

1. Інституційна спроможність
2. Розвиток інтернету
3. Розвиток ЦНАП
4. Режим «без паперів
5. Цифрова освіта
6. Візитівка області
7. Проникнення базових послуг
8. Галузева цифрова трансформація

Більш детально про сутність субіндексів, методику визначення інтегрального індексу та результати розрахунків можна ознайомитись в матеріалах звіту [4].

Разом з тим, ця методика визначення індексу може бути удосконалена. Наприклад, шляхом урахування статистичних даних попередніх років щодо формування цифрового середовища : охоплення регіонів інтернет та засобами зв'язку, кількість ІТ-фахівців та ІТ-фірм, цифрова грамотність населення тощо

Аналіз основних тенденцій розвитку цифрової економіки в Україні за допомогою методів статистичного аналізу, синтезу, порівняння, систематизації та логічного узагальнення розглянуто в роботі [5]. У межах даної статті проаналізовано базові показники що характеризують готовність національної економіки до цифровізації (чисельність і структура підприємств, які мають доступ до мережі Інтернет, які мають вебсайт та інше) Забезпечення стабільного розвитку цифрової економіки вимагає якісного покриття Інтернетом, навчання висококваліфікованих фахівців по роботі з інформаційно-комунікаційними технологіями, розбудови новітньої цифрової інфраструктури та розвитку цифрових сервісів.

В науковій роботі [6] здійснено критичний аналіз результатів розрахунку індексу цифрової трансформації регіонів України за звітом Мінцифри, та зроблено висновок про фрагментарний підхід до формування вказаного інструменту вимірювання на рівні регіонів та про відсутність відповідної методики оцінки на рівні територіальних громад. Авторами розроблено свої пропозиції щодо удосконалення теоретико-методичного підґрунтя оцінки результативності й ефективності цифровізації регіонів і територіальних громад. Вони пропонують залучити пул індикаторів за шістьма напрямками цифровізації економіки у рамках бренду Дія, що характеризують тенденції розвитку даної сфери в Україні.

Метою роботи [7] є розробка концептуального базису оцінки й аналізу цифрового розвитку країни, який, на відміну від інших побудованих на базі методів інтелектуального аналізу багатовимірних об'єктів, що дозволяє підвищити якість формування та ухвалення управлінських рішень із діджиталізації найважливіших напрямків розвитку економіки України. У роботі розглянуто сутність цифровізації та виконано аналіз сучасного стану цифрової трансформації країни; проаналізовано особливості використання комплексу методів системного аналізу та математичного моделювання для оцінки стану цифровізації України. Результати може бути використано в практиці управління цифровим розвитком у державних та регіональних органах.

У статті [8] обґрунтовано доцільність проведення кластерного аналізу з метою дослідження відношення інноваційного процесу та економічного зростання. Оцінку рівня інноваційного розвитку соціально-економічних систем (регіонів та промислових інноваційних підприємств) здійснено на основі

методу багатовимірної статистичного аналізу (ієрархічного кластерного аналізу). У результаті проведеного дослідження за допомогою програмного забезпечення SPSS було виявлено кілька груп кластерів регіонів України.

Методи дослідження.

Кластерний аналіз є однією з основних методологій аналізу багатовимірних даних. Його використання широко поширене і швидко зростає [9]. Кластерний аналіз – це техніка для пошуку областей у n -вимірному просторі з великою концентрацією даних. Ці області називаються «кластерами». Зазвичай основним статистичним показником кластерного аналізу є центр цих кластерів [10].

Кластеризація (об'єднання в групи схожих об'єктів) є однією із фундаментальних задач Data Mining. Кластеризація включає в себе наступні етапи: виділення ознак, визначення метрики, розбиття об'єктів на групи та представлення результатів.

Кластерний аналіз не потребує апріорної інформації про дані та дозволяє розділити множину досліджуваних об'єктів на групи схожих об'єктів – кластери [11].

В роботі [9] задача кластеризації сформульована таким чином:

Є деяка кінцева множина об'єктів довільної природи $C = \{n_1, n_2, \dots, n_N\}$, кожен з яких $n_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ik})$, $i=1, \dots, N$, характеризується набором з K – ознак (вимірюваних характеристик об'єктів). Необхідно класифікувати ці об'єкти, тобто розбити їх множину на задану або довільну кількість груп (кластерів або класів) таким чином, щоб в кожен групу було включено об'єкти близькі між собою в тому чи іншому сенсі. Апріорна інформація про класифікацію об'єктів при цьому відсутня. Таким чином необхідно розбити множину векторів C на k попарно неперетинаючихся класів $C_1, \dots, C_k$ так, щоб $\bigcup_{i=1}^k C_i = C$, де $1 < k < N$.

Для знаходження певного рішення даної задачі необхідно задати: міру схожості, спосіб кластеризації, встановити кількість кластерів.

За способами кластеризації методи кластерного аналізу можна розділити на дві великі групи: ієрархічні та неієрархічні методи [12]. Найбільш поширеними є **ієрархічні методи**, серед яких розрізняють агломеративний і дивізімний методи. На першому кроці **агломеративного методу** кожен об'єкт вважається окремим кластером. Два найбільш близьких об'єкта об'єднуються, і утворюється новий кластер. Процедура триває, доки всі об'єкти не будуть об'єднані в один кластер.

Для **дивізімного методу** спочатку всі об'єкти належать одному кластеру. Від цього кластера відокремлюються групи схожих між собою об'єктів. Так, на кожному кроці кількість кластерів зростає, а міра відстані між класами зменшується.

Другий підхід для процедури розбивки на кластери – ітеративні (неієрархічні) методи угруповання. Для застосування цього підходу необхідною є попередня розбивка даних на задане число кластерів і наступна робота з первинними даними. Ітеративна процедура починається з розбивки даних на задане число кластерів. Потім обчислюються центри ваги цих кластерів. Далі кожен об'єкт поміщають у той кластер, центр ваги якого є найближчим. Обчислюються нові центри ваги кластерів. Обчислення повторюються доти, поки кластери не стають стійкими, тобто перестануть змінюватися [13].

Найвідомішим алгоритмом неієрархічної кластеризації є сімейство алгоритмів K-means [14, 15]. Сутність цього методу полягає в наступному. Припустимо, що вже маємо гіпотези відносно кількості кластерів – тобто заздалегідь визначена кількість кластерів k , на які необхідно розбити наявні об'єкти. Серед множини об'єктів обирають k об'єктів в якості початкових центрів кластерів. Для кожного об'єкту розраховують відстані до центрів кластерів, і даний об'єкт відноситься до того кластера, відстань до якого виявилася мінімальною. Після чого для цього кластеру (в якому змінилася кількість об'єктів) розраховується нове положення центру кластеру (як середнє за кожною ознакою X_i) за всіма залученими до кластеру об'єктами. В загальному випадку, в результаті застосування методу k -середніх вихідна множина об'єктів розділюється рівно на k різних кластерів, розташованих на якнайбільших відстанях один від одного [9].

Відстань між об'єктами n_i та n_j може бути обчислена, наприклад, як Евклідова відстань

$$d(n_i, n_j) = \sqrt{\sum_{l=1}^K x_{il}^2 + x_{jl}^2} \quad (1)$$

Для зберігання інформації про приналежність об'єкту до деякого кластеру в методі k -середніх вводиться матриця $U = \{u_{ij}\}$, $i = 1, \dots, N$ та $j = 1, 2$. В першому стовбці матриці U містяться індекси кластерів, до яких відносяться об'єкти даних в другому стовбці – відстані від об'єктів до відповідних центрів кластерів. Алгоритм k -середніх є ітераційним (рис. 1). Автоматичне групування об'єктів в кластери припиняється при виконанні одного з критеріїв зупинки автоматичного групування.



Рис. 1. Схема алгоритму кластеризації за методом k-середніх

Комп'ютерні експерименти по вибору метода дослідження.

В якості середовища проведення експериментів обрано SPSS Statistics – програмну платформу статистичного аналізу з потужним набором функцій [16]. SPSS Statistics дозволяє проводити кластеризацію ієрархічними та неієрархічними методами.

Вихідні дані для дослідження (таб.1) – підсумкові показники цифрової трансформації регіонів України 2022 року за даними Міністерства цифрової трансформації України [4].

Таблиця 1

Вихідні дані								
Область	Інституційна спроможність	Розвиток інтернету	Розвиток ЦНАП	Режим «без паперів»	Цифрова освіта	Візитівка області	Проникнення базових електронних послуг	Галузева цифрова трансформація
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Вінницька	16	0,743	0,852	0,894	0,778	0,4	0,696	0,721
Волинська	0,6	0,733	0,911	0,928	0,256	0	0,772	0,716
Дніпропетровська	1	0,993	0,972	0,952	0,694	1	0,754	0,924
Донецька	0,325	0,252	0,631	0,527	0,396	0,68	0,596	0,345
Житомирська	0,38	0,909	0,895	0,859	0,349	0,4	0,646	0,403
Закарпатська	0,571	0,868	0,841	0,85	0,372	1	0,766	0,504
Запорізька	0,331	0,405	0,385	0,063	0,155	0,4	0,595	0,261
Івано-Франківська	0,81	0,896	0,853	0,162	0,124	0,8	0,78	0,338
Київська	0,71	0,377	0,824	0,711	0,258	1	0,61	0,21
Кіровоградська	0,213	0,388	0,664	0,531	0,163	0	0,614	0,154
Луганська	0,093	0,1	0,743	0,459	0,262	0,4	0,623	0,224
Львівська	0,89	0,833	0,822	0,924	0,562	0,8	0,68	0,82
Миколаївська	0,11	0,53	0,467	0,497	0,509	0,6	0,427	0,3

Закінчення табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Одеська	0,9	0,841	0,705	0,958	0,702	1	0,877	0,808
Полтавська	0,8	0,894	0,905	0,967	0,88	0,6	0,737	0,56
Рівненська	1	0,907	0,875	0,891	0,195	0,8	0,705	0,573
Сумська	0,44	0,471	0,763	0,569	0,605	0	0,622	0,321
Тернопільська	1	0,992	0,83	0,933	0,718	1	0,834	0,999
Харківська	0,794	0,615	0,703	0,553	0,152	0,48	0,544	0,325
Херсонська	0,441	0,428	0,787	0,693	0,589	0,4	0,438	0,066
Хмельницька	0,861	0,609	0,719	0,653	0,165	0,4	0,596	0,458
Черкаська	0,744	0,771	0,855	0,803	0,312	0,6	0,759	0,387
Чернівецька	0,37	0,633	0,852	0,39	0,13	0,4	0,596	0,211
Чернігівська	0,493	0,612	0,629	0,596	0,267	0,4	0,4	0,507

Було проведено декілька експериментів по дослідженню методів кластеризації та кількості кластерів.

Ієрархічна кластеризація.

Ієрархічний метод використовує послідовне об'єднання об'єктів у кластери, малих кластерів у великі, що може бути візуально представлене у вигляді дерева вкладених кластерів – дендрограми (рис. 2). На графі дендрограми вздовж осі x є значення міри схожості, вздовж осі y – номери областей.

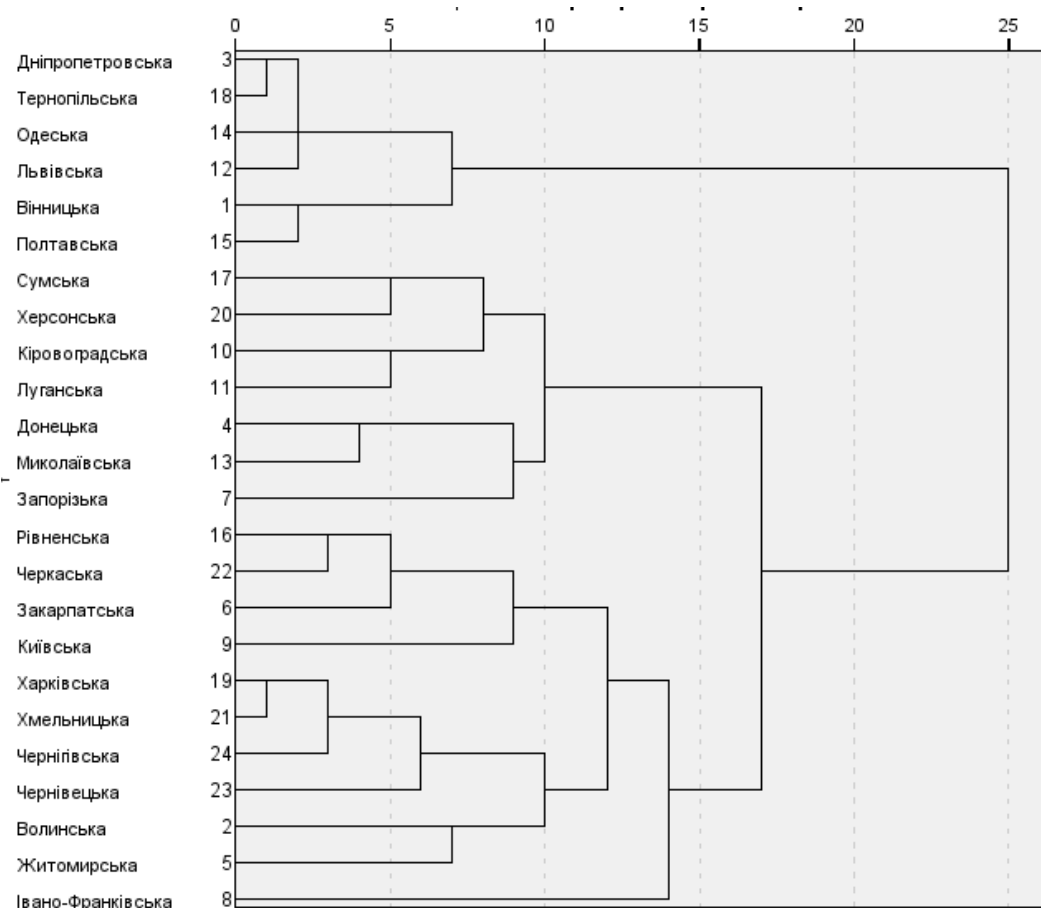


Рис. 2. Дендрограма поділу областей

Цей метод добре підходить на початковому етапі візуалізації та встановлення числа кластерів. На першому кроці в кластери об'єдналися (3, 18) та (19, 21). Потім утворився кластер (1 15). Відстань між його елементами більше, ніж між елементами, які об'єдналися на першому кроці. Далі в один кластер об'єднуються (3, 18, 12). Аналогічним чином можна поєднати інші об'єкти в кластери. Процес завершується, коли всі об'єкти об'єднані в один кластер. Рішення по кількості кластерів приймається дослідни-

ком. Аналіз дендрограми (рис. 2) дозволяє виділити п'ять кластерів однорідних станів в спостережуваній сукупності даних: (3, 18, 14, 12, 1, 15), (17, 20, 10, 11), (4, 13, 7), (16, 22, 6, 9), (19, 21, 24, 23, 2, 5, 8).

Кластеризація к-середніми

Особливістю цього підходу є необхідність попереднього визначення числа кластерів. Експериментально було проведено кластеризацію для N=3, 4, 5. Результати наведено у таблиці 2.

Таблиця 2

Експериментальні виділення кластерів

N=3		N=4		N=5	
Область	Кластер	Область	Кластер	Область	Кластер
Донецька	1	Івано-Франківська	1	Івано-Франківська	1
Запорізька	1	Київська	1	Київська	1
Івано-Франківська	1	Харківська	1	Харківська	1
Київська	1	Хмельницька	1	Хмельницька	1
Кіровоградська	1	Черкаська	1	Черкаська	1
Луганська	1	Вінницька	2	Вінницька	2
Миколаївська	1	Волинська	2	Волинська	2
Харківська	1	Житомирська	2	Житомирська	2
Херсонська	1	Сумська	2	Дніпропетровська	3
Чернівецька	1	Дніпропетровська	3	Закарпатська	3
Чернігівська	1	Закарпатська	3	Львівська	3
Вінницька	2	Львівська	3	Одеська	3
Волинська	2	Одеська	3	Полтавська	3
Житомирська	2	Полтавська	3	Рівненська	3
Сумська	2	Рівненська	3	Тернопільська	3
Хмельницька	2	Тернопільська	3	Запорізька	4
Черкаська	2	Донецька	4	Кіровоградська	4
Дніпропетровська	3	Запорізька	4	Луганська	4
Закарпатська	3	Кіровоградська	4	Чернівецька	4
Львівська	3	Луганська	4	Донецька	5
Одеська	3	Миколаївська	4	Миколаївська	5
Полтавська	3	Херсонська	4	Сумська	5
Рівненська	3	Чернівецька	4	Херсонська	5
Тернопільська	3	Чернігівська	4	Чернігівська	5

Для змістовного аналізу даних кластерів були побудовані діаграми (рис. 3-5).

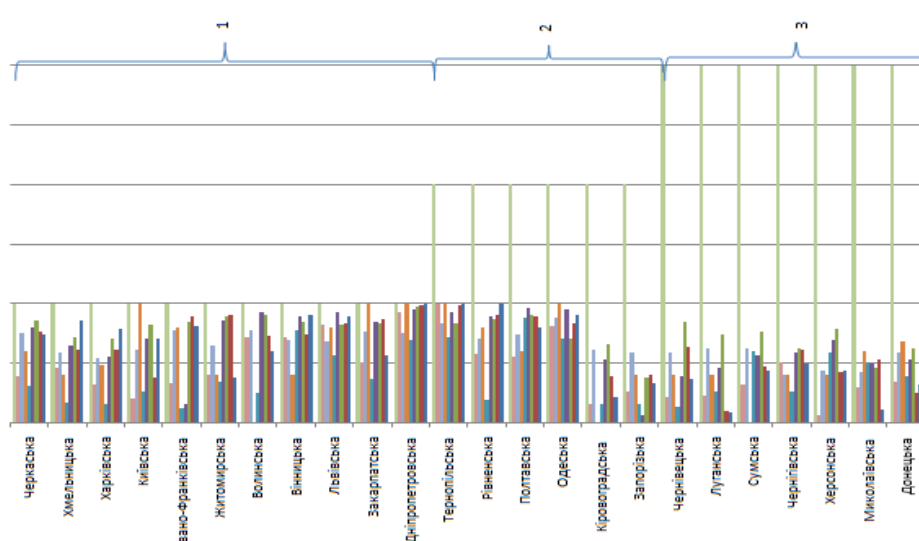


Рис. 3. Розбиття на кластери, N=3

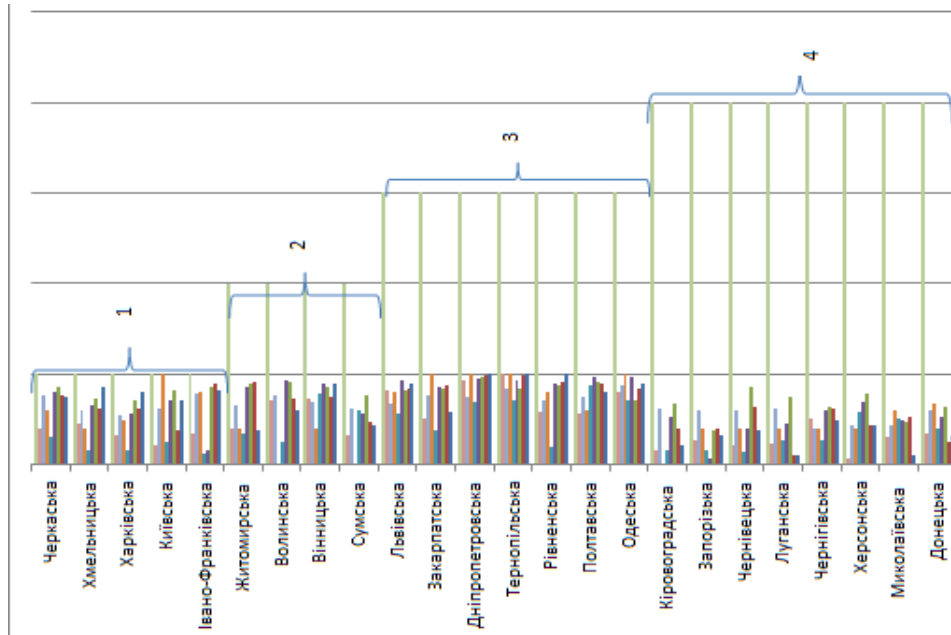


Рис. 4. Розбиття на кластери, N=4

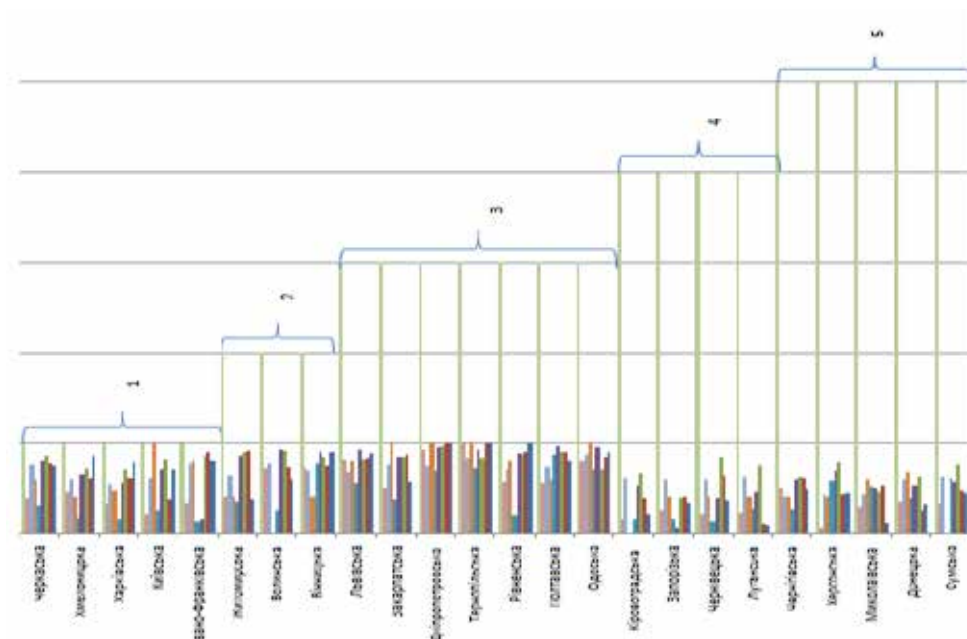


Рис. 5. Розбиття на кластери, N=5

На рис. 3 спостерігаємо доволі неоднорідне розподілення областей за показниками. Особливо в другому кластері. Збільшення числа кластерів (рис. 4) покращує загальну картину. Проте кластери 3-4 доволі неоднорідні. Варіант розбиття на п'ять кластерів дає найбільш логічно зрозумілу картину. Обрання цього варіанту дозволяє сформувати групи областей за такими рівнями показників: низький, нижче середнього, середній, вище середнього, високий.

Зведена таблиця 3 дає змогу оцінити кластери за рівнями показників. В ній наведені дані відхилення середнього значення по кластеру від середнього по Україні.

Таблиця 3

Зведена таблиця за середніми показниками для n=5

кластер	Інституційна спроможність	Розвиток інтернету	Розвиток ЦНАП	Режим «без паперів»	Цифрова освіта	Візитівка області	Проникнення базових електронних послуг	Галузева цифрова трансформація	рівні
4	0,38	0,30	0,11	0,33	0,229	0,27	0,04	0,26	низький
5	0,27	0,22	0,11	0,11	-0,06	0,15	0,15	0,16	нижче середнього
1	-0,14	0,02	-0,02	0,11	0,20	-0,08	0,00	0,13	середній
2	0,01	-0,11	-0,11	-0,20	-0,05	0,30	-0,05	-0,13	вище середнього
3	-0,24	-0,22	-0,07	-0,23	-0,18	-0,31	-0,11	-0,26	високий

Ці дані візуалізовано на рис. 6.

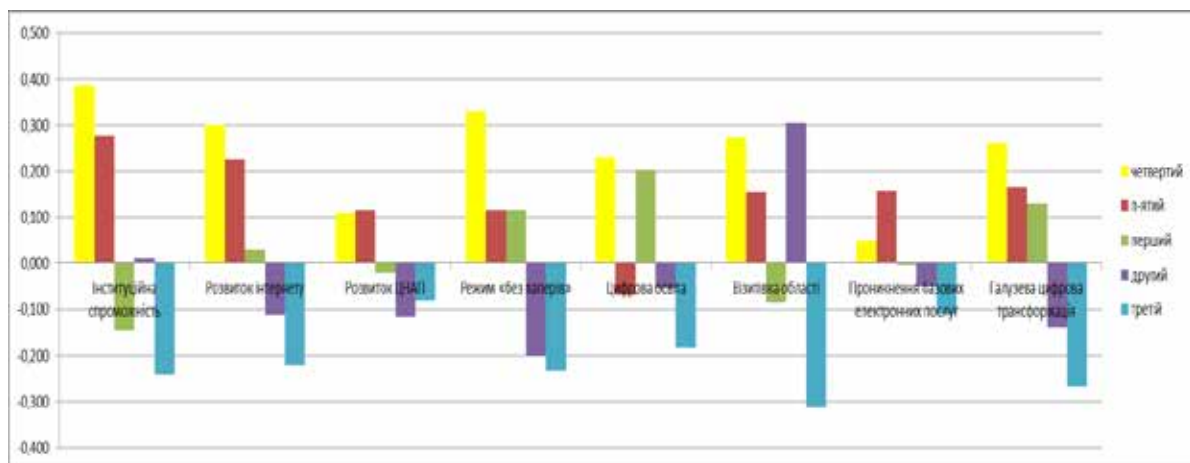


Рис. 6. Показники відхилення середніх значень по кластеру від середніх по Україні

На рисунку 7 жовтим кольором виділені мінімальні значення показників, фіолетовим – максимальні значення. Візуальний аналіз дозволяє виділити кластери, які містять найменші та найбільші значення за показниками. Так перший кластер (середній рівень) містить один найменший елемент (*Цифрова освіта*). Другий кластер (вище середнього) кращі показники – один найменший (*Візитівка області*) та один найбільший (*Розвиток ЦНАП*). Третій (високий рівень) містить всі інші найбільші значення. Кластер 5 (нижче середнього) містить два найменших значення (*Візитівка області* та *Галузева цифрова трансформація*). Четвертий кластер (низький рівень) містить решту найменших значень.

До **першого кластеру** надійшли області Івано-Франківська, Київська, Харківська, Хмельницька, Черкаська. В перший кластер увійшли регіони, які мають середні показники по Україні. Серед найгірших можна виділити *Цифрову освіту* та *Галузеву цифрову трансформацію*. Найкращим показником є *Інституційна спроможність* та *Розвиток ЦНАП*. Середні значення по *Розвитку Інтернету* та *Галузевій трансформації*. За 4 показниками області кластеру краще за середні показники по Україні. За 4 показниками області кластеру мають значення менше середнього по Україні.

До **другого кластеру** увійшли області Вінницька, Волинська, Житомирська. В другий кластер надійшли регіони, які мають рівень середній та вище середнього. Найкращий показник *Розвиток ЦНАП* та *Режим без паперів*. Найгірший *Візитівка області*. За 6 показниками області кластеру краще за середні показники по Україні. За 2 показниками області кластеру мають значення менше середнього по Україні.

До **третього кластеру** надійшли області з найкращими показниками. Дніпропетровська, Закарпатська, Львівська, Одеська, Полтавська, Рівненська, Тернопільська. Всі показники вище середніх.

Область	Інституційна спроможність	Розвиток інтернету	Розвиток ЦНАП	Режим «без паперів»	Цифрова освіта	Візитівка області	Проникнення базових електронних послуг	Галузева цифрова трансформація	Клас	Показник
Черкаська	0,744	0,771	0,855	0,803	0,312	0,6	0,759	0,387	1	0,716
Івано-Франківська	0,81	0,896	0,853	0,162	0,124	0,8	0,78	0,338	1	0,683
Хмельницька	0,861	0,609	0,719	0,653	0,165	0,4	0,596	0,458	1	0,61
Київська	0,71	0,377	0,824	0,711	0,258	1	0,61	0,21	1	0,588
Харківська	0,794	0,615	0,703	0,553	0,152	0,48	0,544	0,325	1	0,571
Вінницька	0,9	0,743	0,852	0,894	0,778	0,4	0,696	0,721	2	0,769
Волинська	0,6	0,733	0,911	0,928	0,256	0	0,772	0,716	2	0,72
Житомирська	0,38	0,909	0,895	0,859	0,349	0,4	0,646	0,403	2	0,692
Дніпропетровська	1	0,993	0,972	0,952	0,694	1	0,754	0,924	3	0,916
Тернопільська	1	0,992	0,83	0,933	0,718	1	0,834	0,999	3	0,91
Одеська	0,9	0,841	0,705	0,958	0,702	1	0,877	0,808	3	0,836
Полтавська	0,8	0,894	0,905	0,967	0,88	0,6	0,737	0,56	3	0,814
Львівська	0,89	0,833	0,822	0,924	0,562	0,8	0,68	0,82	3	0,799
Рівненська	1	0,907	0,875	0,891	0,195	0,8	0,705	0,573	3	0,794
Закарпатська	0,571	0,868	0,841	0,85	0,372	1	0,766	0,504	3	0,756
Чернівецька	0,37	0,633	0,852	0,39	0,13	0,4	0,596	0,211	4	0,54
Кіровоградська	0,213	0,388	0,664	0,531	0,163	0	0,614	0,154	4	0,431
Луганська	0,093	0,1	0,743	0,459	0,262	0,4	0,623	0,224	4	0,404
Запорізька	0,331	0,405	0,385	0,063	0,155	0,4	0,595	0,261	4	0,37
Сумська	0,44	0,471	0,763	0,569	0,605	0	0,622	0,321	5	0,534
Чернігівська	0,493	0,612	0,629	0,596	0,267	0,4	0,4	0,507	5	0,522
Херсонська	0,441	0,428	0,787	0,693	0,589	0,4	0,438	0,066	5	0,5
Донецька	0,325	0,252	0,631	0,527	0,396	0,68	0,596	0,345	5	0,469
Миколаївська	0,11	0,53	0,467	0,497	0,509	0,6	0,427	0,3	5	0,431

Рис. 7. Порівняльна таблиця максимальних та мінімальних значень

До четвертого кластеру надійшли області з найгіршими показниками. Запорізька, Кіровоградська, Луганська, Чернівецька. Це кластер з найменшими показниками. Всі показники менші за середні.

В останній кластер надійшли області, показники в яких нижче середнього рівня. Донецька, Миколаївська, Сумська, Херсонська, Чернігівська. Тільки за показником *Цифрова освіта* даний кластер перевищує середні показники.

Обговорення результатів.

Проведено порівняння результатів наших досліджень з висновками звіту Індекс цифрової трансформації регіонів України [4]. За методикою Міністерства цифрової трансформації індекси регіонів визначались як сума середніх значень субіндексів з урахуванням вагових коефіцієнтів та вимірювались у відсотковому значенні. Результати порівняння дозволяють зробити висновок про майже точне співвідношення (табл. 4).

Таблиця 4

Порівняльна таблиця результатів кластеризації та показнику Індeksu цифровізації

Область	Кластер	Показник Індeksu
1	2	3
Дніпропетровська	3	0,916
Тернопільська	3	0,91
Одеська	3	0,836
Полтавська	3	0,814
Львівська	3	0,799
Рівненська	3	0,794
Вінницька	2	0,769
Закарпатська	3	0,756
Волинська	2	0,72
Черкаська	1	0,716
Житомирська	2	0,692
Івано-Франківська	1	0,683
Хмельницька	1	0,61
Київська	1	0,588
Харківська	1	0,571
Чернівецька	4	0,54
Сумська	5	0,534
Чернігівська	5	0,522

Закінчення табл. 4

Херсонська	5	0,5
Донецька	5	0,469
Кіровоградська	4	0,431
Миколаївська	5	0,431
Луганська	4	0,404
Запорізька	4	0,37

Результати кластеризації за к-середніх майже точно співвідносяться з показником Індексу. Сортування областей за рівнем показника Індексу цифровізації майже не змінило картину кластерів. Метод к-середніх дав логічно зрозумілі результати. Тому для програмної реалізації та подальших досліджень має сенс обрати саме цей метод.

Висновки та перспективи подальших досліджень.

Проведено інформаційно-аналітичний огляд досліджень стану цифровізації регіональних систем України, наявності методик визначення показників цифрових трансформацій. Найбільш комплексним та сучасним є дослідження Міністерства цифрової трансформації України з визначення індексу цифрової трансформації регіонів за результатами 2022 року. Хоча ця методика визначення індексу потребує удосконалення. Наприклад, потрібно урахування наявних статистичних даних попередніх років щодо формування цифрового середовища : охоплення регіонів інтернет та засобами зв'язку, кількість ІТ-фахівців та ІТ-фірм, цифрова грамотність населення тощо. Це дозволить покращити базу вхідних даних та виконувати аналіз трендів розвитку регіонів.

Для підготовки підґрунтя подальших досліджень узгодженості показників цифрових трансформацій регіонів з показниками суспільно-економічного розвитку, для визначення спільних груп/кластерів регіонів – щоб для них формувати відповідні пакети суспільно-економічних рекомендацій, був обраний кластерний аналіз.

На основі аналітичних міркувань та числових експериментів обрано метод кластеризації та алгоритм для програмної реалізації в підсистемі кластеризації системи підтримки прийняття рішень щодо аналізу цифрової трансформації регіонів.

Комп'ютерний експеримент з побудови системи кластерів проведено з використанням даних звіту Міністерства цифрової трансформації України – підсумкових показників (субіндексів) цифрової трансформації регіонів 2022 року. За результатами обчислень сформована система з п'яти кластерів. Порівняння цих результатів з інтегральними індексами цифрової трансформації регіонів [4], які визначені за іншою методикою, демонструє гарну узгодженість.

Це дозволяє рекомендувати запропоновану процедуру кластеризації для обробки наявних точкових статистичних даних попередніх років, виконання їх узгодження з результатами 2022 р. За результатом буде підготовлено фундамент, порівняльну базу для визначення трендів цифровізації та подальшого планування суспільно-економічного розвитку регіонів.

Список використаних джерел:

1. Цифрова економіка: тренди, ризики та соціальні детермінанти / за ред. О. Пішулиної. Київ : Центр Разумкова, «Заповіт», 2020. 274 с.
2. Результати цифрової трансформації в регіонах України. *Міністерство цифрової трансформації України*. URL: <https://thedigital.gov.ua/news/rezultati-tsifrovoi-transformatsii-v-regionakh-ukraini-1> (дата звернення: 01.08.2023).
3. Державна служба статистики України. URL: <https://ukrstat.gov.ua/> (дата звернення: 01.08.2023).
4. Індекс цифрової трансформації регіонів України. Підсумки 2022 року. *Міністерство цифрової трансформації України*. URL: <https://drive.google.com/drive/folders/1Wp6laHb0uRKb68mgebq8CvZbgBxupkCz> (дата звернення: 02.08.2023).
5. Котелевець Д.О. Тенденції розвитку цифрової економіки в Україні. *Проблеми сучасних трансформацій. Серія: економіка та управління*. 2022. № 5. DOI: 10.54929/2786-5738-2022-5-03-01 (дата звернення: 03.08.2023).
6. Рогозян Ю.С., Вахлакова В.В. Теоретико-методичні аспекти оцінки результативності й ефективності цифровізації економіки локальних територій України у воєнний і повоєнний час. *Академічні Візії*. 2023. № 19. URL: <http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.7989723> (дата звернення: 04.08.2023).
7. Чаговець Л.О. Концептуальний базис оцінки й аналізу стану цифровізації України. *Digitalization and Information Society. Selected Issues. – Katowice: Publishing House of University of Technology*. 2023. С. 85–108. URL: <http://repository.hneu.edu.ua/handle/123456789/27670> (дата звернення: 03.08.2023).
8. Горященко Ю.Г. Застосування кластерного аналізу для оцінки інноваційного розвитку соціально-економічних систем. *Підприємництво і торгівля*. 2021. № 30. С. 25–32. DOI: 10.36477/2522-1256-2021-30-04.

9. Гавриленко О.В. Навчальний посібник з дисциплін Аналіз даних та Аналіз даних в управляючих системах : навчальний посібник. Київ: КПІ, 2020. – 85 с.
10. Zhao W., Chellappa R. *Face Processing: Advanced Modeling and Methods*. Elsevier, 2011. 768 p.
11. Марченко О.О., Росада Т.В. Актуальні проблеми Data Mining : навчальний посібник. Київ : КНУ ім. Т. Шевченка, 2017. 150 с.
12. Бізнес-аналітика багатовимірних процесів / Т.С. Клебанова та ін. : навчальний посібник. Харків: ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2018. 271 с.
13. Караєва Н.В., Варава І.А. Еколого-економічна оптимізація виробництва: методи та засоби кластерного аналізу : методичні вказівки. Київ : НТУУ «КПІ», 2016. 36 с.
14. Su, M.C.; Chou, C.H. A modified version of the K-means algorithm with a distance based on cluster symmetry. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2001. Vol. 23, № 6. P. 674–680. DOI:10.1109/34.927466.
15. Ahmed M., Seraj R., Islam S. M.S. The k-means Algorithm: A Comprehensive Survey and Performance Evaluation. *Electronics*. 2020. Vol. 9, № 8. P. 1–12. URL: <https://doi.org/10.3390/electronics9081295> (date of access: 03.08.2023).
16. Why IBM SPSS software? *IBM SPSS Software*. URL: <https://www.ibm.com/spss> (date of access: 03.08.2023).

References:

1. Pishhulyna, O. (Eds.). (2020). *Cyfrowa ekonomika: trendy, ryzyky ta socialni determinanty [Digital economy: trends, risks and social determinants]*. Kyiv: Centr Razumkova, «Zapovit» [in Ukrainian].
2. Sait Ministerstva cyfrovoy transformacii Ukrainy «Rezultaty cyfrovoy transformacii v regionah Ukrainy» [Site of the Ministry of Digital Transformation of Ukraine]. *thedigital.gov.ua*. Retrieved from <https://thedigital.gov.ua/news/rezultaty-tsifrovoy-transformatsii-v-regionakh-ukraini-1> [in Ukrainian].
3. Sait Derzhavnoi sluzhby statystyky Ukrainy. [Sait of the State Statistics Service of Ukraine]. <https://ukrstat.gov.ua/>. Retrieved from <https://ukrstat.gov.ua/> [in Ukrainian].
4. Ministerstvo cyfrovoy transformacii Ukrainy «Indeks cyfrovoy transformacii regioniv Ukrainy. Pidsumky 2022 roku» [Ministry of Digital Transformation of Ukraine «Index of Digital Transformation of the Regions of Ukraine. Results of 2022»]. (n.d.). <https://drive.google.com/drive/folders/1Wp6laHb0uRKb68mgebq8CvZbgBxupkCz>. Retrieved from <https://drive.google.com/drive/folders/1Wp6laHb0uRKb68mgebq8CvZbgBxupkCz> [in Ukrainian].
5. Kotelevets, D.O. (2022). Tendencii rozvytku cyfrovoy ekonomiky v Ukrainy [Trends in the development of the digital economy in Ukraine]. *Problemy suchasnyh transformacij. Serija: ekonomika ta upravlinnja. – Problems of modern transformations. Series: Economics and Management*, 5. Retrieved from DOI: 10.54929/2786-5738-2022-5-03-01 [in Ukrainian].
6. Rogozjan Ju.S., & Vahlakova V.V. (2023). Teoretyko-metodychni aspekty ocinky rezultatyvnosti j efektyvnosti cyfrovizacii ekonomiky lokalnyh terytorij Ukrainy u vojennyj i povojennyj chas [Theoretical and methodical aspects of assessing the effectiveness and efficiency of the economy digitalization for local territories of Ukraine in war and post-war period]. *Akademichni Vizii – Academy Vision*, 19. Retrieved from URL: <http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.7989723> [in Ukrainian].
7. Chagovec L.O. (2022). Konceptualnyj bazys ocinky j analizu stanu cyfrovizacii Ukrainy [Conceptual basis of evaluation and analysis of the state of digitization of Ukraine]. *Digitalization and Information Society. Selected Issues. – Katowice: Publishing House of University of Technology*, 85-108. Retrieved from <http://repository.hneu.edu.ua/handle/123456789/27670> [in Ukrainian].
8. Horiashchenko, Yu.G. (2021). Zastosuvannja klasterного analizu dlja ocinky innovacijnogo rozvytku socialno-ekonomichnyh system [Application of cluster analysis for assessment of innovative development of socio-economic systems]. *Pidpryjemnyctvo i torivlja – Entrepreneurship and Trade*, 30, 25–32. Retrieved from DOI: 10.36477/2522-1256-2021-30-04 [in Ukrainian].
9. Gavrylenko, O.V. (2020). *Navchalnyj posibnyk z dyscyplin Analiz danyh ta Analiz danyh v upravljajuchykh systemah [Study guide for disciplines Data analysis and Data analysis in control systems]*. Kyiv: KPI [in Ukrainian].
10. Zhao, W., & Chellappa, R. (2011). *Face Processing: Advanced Modeling and Methods*. Elsevier.
11. Marchenko, O.O., & Rossada, T.V. (2017). *Aktualni problemy Data Mining [Actual problems of Data Mining]*. Kyiv: KNU T. Shevchenko [in Ukrainian].
12. Klebanova, T.S., Gurjanova, L.S., Chagovec, L.O., Panasenko, O.V., Sergijenko, O.A., & Jacenko, R.M. (2020). *Biznes-analityka bagatovymirnyh procesiv [Business Analysis of Multidimensional Processes]*. Kharkiv: HNEU S. Kuznecja [in Ukrainian].
13. Karajeva, N.V., & Varava, I.A. (2016). *Ekologo-ekonomichna optymizacija vyrobnyctva: metody ta zasoby klasterного analizu [Ecological and economic optimization of production: methods and resources of cluster analysis]*. Kyiv: NTUU «KPI» [in Ukrainian].
14. Su, M.C., & Chou, C.H. (2001). A modified version of the K-means algorithm with a distance based on cluster symmetry. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. (Vol. 23), 6. 674–680. DOI: 10.1109/34.927466.
15. Ahmed, M., Seraj R., & Islam S. M.S. (2020). The k-means Algorithm: A Comprehensive Survey and Performance Evaluation. *Electronics*. (Vol. 9), 8. 1-12. URL: <https://doi.org/10.3390/electronics9081295>.
16. IBM SPSS Software. «Why IBM SPSS software?». www.ibm.com. Retrieved from URL: <https://www.ibm.com/spss>.

УДК 004.415.23:006.32(045.2)

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.2.2>

Віктор БОЙКО

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри кібербезпеки, Національний університет «Одеська юридична академія», вул. Рішельєвська, 28, Одеса, Україна, індекс 65011 (boyko-work@ukr.net)

ORCID: 0000-0001-5929-657X

Микола ВАСИЛЕНКО

доктор фізико-математичних наук, доктор юридичних наук, професор, професор кафедри кібербезпеки, Національний університет «Одеська юридична академія», вул. Рішельєвська, 28, Одеса, Україна, індекс 65011 (vasylenko.it@journals.maup.kiev.ua)

ORCID: 0000-0002-8555-5712

Валерія СЛАТВІНСЬКА

асистент кафедри кібербезпеки, Національний університет «Одеська юридична академія», вул. Рішельєвська, 28, Одеса, Україна, індекс 65011 (slatvinskaya_valeriya@ukr.net)

ORCID: 0000-0002-6082-981X

Viktor BOYKO

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Cybersecurity, National University "Odesa Law Academy", 28 Richelevska str., Odesa, Ukraine, postal code 65011 (boyko-work@ukr.net)

Nikolai VASILENKO

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Doctor of Law, Professor, Professor at the Department of Cybersecurity, National University "Odessa Law Academy", 28 Richelevskaya str., Odessa, Ukraine, postal code 65011 (vasylenko.it@journals.maup.kiev.ua)

Valeriia SLATVINSKA

Assistant Professor at the Department of Cybersecurity, National University "Odessa Law Academy", 28 Richelevskaya str., Odessa, Ukraine, postal code 65011 (slatvinskaya_valeriya@ukr.net)

Бібліографічний опис статті: Бойко, В., Василенко, М., Слатвінська, В. Програмування за допомогою систем генеративного штучного інтелекту: ризики та виклики. *Інформаційні технології та суспільство*. 2023. Вип. 2(8). 18–26. DOI: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.2.2>

Bibliographic description of the article: Boyko, V., Vasilenko, M., Slatvinska, V. (2023). Prohramuvannia za dopomohoiu system heneratyvnoho shtuchnoho intelektu: ryzyky ta vyklyky [Programming with the help of generative artificial intelligence systems: risks and challenges]. *Informatsiini tekhnolohii ta suspilstvo – Information technology and society*, 2(8), 18–26. DOI: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.2.2>

ПРОГРАМУВАННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ СИСТЕМ ГЕНЕРАТИВНОГО ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ: РИЗИКИ ТА ВИКЛИКИ

У статті розглянуто ризики, пов'язані з використанням генеративних систем штучного інтелекту (GenAI). Автори наголошують на тому, що країни з технологічно розвиненими законодавчими системами вже регулюють використання GenAI з огляду на захист даних та кібербезпеку. Вказано також на проєкт з адміністрування генеративних послуг у Китаї, в якому наголошено на відповідальності постачальників послуг GenAI за безпеку та точність згенерованого контенту. В контексті з цим автори обговорюють ризики, пов'язані з розробкою програмного забезпечення та ІТ-продуктів, зокрема використанням LLMAP (Large Language Models for Application Programming). Запропонована класифікація ризиків розрізняє пасивні ризики, що виникають при роботі з GenAI, та активні ризики, пов'язані зі свідомим зловживанням. Автори доводять важливість усвідомленого підходу до використання GenAI та розвитку відповідних заходів контролю та безпеки.

Результати дослідження протиставляються рекламним заявам про генеративні системи (GenAI) та вказують на їхню потенційну незавершеність, а також на непередбачуваність якості коду. Наголошується на необхідності урахування пасивних й активних ризиків, пов'язаних з використанням таких систем. Пасивні ризики включають можливість помилок та «галюцинацій» у видачі GenAI, проблеми з генерацією складного коду та неконтрольоване поширення результатів їх роботи. Активні ризики включають можливість зворотного інжинірингу баз даних, зламу системи та отримання "заборонених" даних. Автори рекомендують проводити суворий контроль за використанням GenAI в критичних галузях, які вимагають безперебійної роботи та низької ймовірності помилок. Ними також вказано на необхідність вдосконалення технічних, організаційних і законодавчих заходів для ефективного

використання GenAI, таких як контроль якості баз даних, відкритий доступ до вихідних кодів та розвиток систем аудиту і контролю з урахуванням прогресу.

Ключові слова: штучний інтелект, програмування, ризик, генеративна система штучного інтелекту, машинне навчання.

PROGRAMMING WITH THE HELP OF GENERATIVE ARTIFICIAL INTELLIGENCE SYSTEMS: RISKS AND CHALLENGES

The article discusses the risks associated with the use of generative artificial intelligence (GenAI) systems. The authors emphasize that countries with technologically advanced legal systems, such as Italy and Switzerland, already regulate the use of GenAI in terms of data protection and cybersecurity. They also mention a project on the administration of generative services in China, which emphasizes the responsibility of GenAI service providers for the security and accuracy of the generated content. The authors go on to discuss the risks associated with software and IT product development, in particular the use of LLMAP (Large Language Models for Application Programming). The proposed classification of risks distinguishes between passive risks arising from working with GenAI and active risks associated with deliberate misuse. The authors point out the need for a conscious approach to the use of GenAI and the development of appropriate control and security measures.

This paper contradicts advertising claims about generative systems (GenAI) and points out their potential incompleteness and unpredictability of code quality. The authors emphasize the need to take into account the passive and active risks associated with the use of such systems. Passive risks include the possibility of errors and hallucinations in the issuance of GenAI, problems with the generation of complex code, and uncontrolled dissemination of the results of their work. Active risks include the possibility of reverse engineering databases, hacking the system, and obtaining "forbidden" data. The authors recommend strict control over the use of GenAI in critical industries that require uninterrupted operation and a low probability of errors. The authors also point out the need to improve technical, organizational and legislative measures for the effective use of GenAI, such as database quality control, open access to source codes and the development of audit and control systems based on progress.

Key words: artificial intelligence, programming, risk, generative artificial intelligence system, machine learning.

Актуальність проблеми. Останнім часом спостерігається бум щодо використання генеративних систем штучного інтелекту – generative AI (GenAI). На відміну від систем штучного інтелекту «старої школи», що орієнтувалися на «пасивне» розпізнавання образів, класифікацію та аналіз даних, системи GenAI призначені для «активної» генерації (тексту, аудіофайлів, відеофайлів і зображень). Ідеї, що використовуються в цих системах, не нові, зокрема, "генеративна частина" роботи обґрунтовувалася ще для перших систем AI/ML наприкінці 60-их на початку 70-их років XX століття. Так наприклад, відомо про можливий перехід від системи DENDRAL до META-DENDRAL [1], однак до поточного моменту технічний стан обчислювальної бази та обсяги доступної інформації не давали змоги реалізувати GenAI «в залізі».

Сучасні системи найчастіше використовують LLM – large language models, які являють собою вже апробоване рішення в галузі штучного інтелекту та машинного навчання (AI/ML) – здебільшого це неймережа з великою кількістю параметрів (приблизно від десятків мільйонів до мільярдів), для навчання якої використовують великі обсяги даних, водночас навчання ведуть або в режимі «без учителя», або за часткової участі людини. З'явився спеціальний термін prompt engineering – і відповідно prompt engineer. Саме так називають операторів, які беруть участь у генерації контенту, які вводять і оптимізують параметри завдання для GenAI [2]. Деякі автори, розглядаючи цю взаємодію, як частину людино-машинної системи, говорять про те, що термін Human-Computer Interaction (HCI) потребує розширення, і наразі слід говорити про взаємодію систем «людина – штучний інтелект» (Human-AI Interaction – HAI) [3]. Впровадження HAI систем дає змогу деяким дослідникам говорити про те, що вони дадуть змогу значно розвантажити людину в перспективі, зменшити стрес і збільшити її задоволеність роботою [4].

Практика використання різних систем генеративного контенту поширилася на можливість генерувати вихідний код різного призначення, які використовуються для найрізноманітніших цілей – зокрема для написання коду. Такі HAI розглянуті в статті [5] і отримали назву programming with large language models (LLM-assisted programming – LLMAP). У ній йдеться про можливості генерації коду за допомогою GenAI. Автори розглядають процес як «запит на вході» (власне, prompt) і «код на виході». При цьому процес програмування за допомогою GenAI може містити й інші підзадачі: генерація змінних типів, генерація коментарів, виявлення частин коду, що дублюються, міграція коду з однієї мови програмування на іншу тощо. На нашу думку, можна ще зазначити, що і поширилася практика використання GenAI у вигляді «розширеної довідкової системи», що видає пояснення або вихідні коди готового коду у відповідь на запит на кшталт «напиши мені алгоритм бульбашкового сортування на мові «Ruby» або «перерахуй бібліотеки для добування метаданих за допомогою Perl із файлів цифрових зображень і наведи приклади коду».

Істотний інтерес представляє собою прогнозування та визначення трендів і можливостей HAI-систем у перспективі. Однак, крім оптимістичних прогнозів, існує ще один бік такої взаємодії, який часто випадає з розгляду, а саме, безпека HAI систем, особливо – кібербезпека, виклики та ризики процесів розроблення програмного забезпечення, в яких використовуються GenAI для створення коду.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Існує інформація [2], в якій увага зосереджена на використанні помічників у програмуванні для підвищення продуктивності та креативності. Вона пропонує розуміння переваг та викликів використання помічників для написання текстів на основі штучного інтелекту в контексті розробки програмного забезпечення. В статті [3] представлено таксономію швидких модифікаторів для перетворення тексту в зображення. В ній досліджуються методи та підходи для підвищення якості та контролю згенерованих зображень, забезпечуючи систематичну основу для дослідників та розробників, які працюють у цій галузі. В [4] розглядається вплив GenAI на продуктивність системи за допомогою експериментальних даних. Досліджують, як використання GenAI впливає на продуктивність у різних сферах, надаючи уявлення про його потенційні переваги та наслідки для різних галузей. В [5] досліджують досвід та проблеми програмування зі штучним інтелектом. Її результати заглиблюють в перспективи програмістів та їхню взаємодію з системами штучного інтелекту, проливаючи світло на еволюцію практик програмування в контексті штучного інтелекту. В [11] вивчається феномен галюцинацій штучного інтелекту в науковому письмі за допомогою посилань на ChatGPT. Акцентується увага на проблемах та наслідках використання контенту, створеного штучним інтелектом, у наукових публікаціях.

Натомість через зростання зацікавленості щодо використання систем GenAI в програмуванні, автори (Б., В., С.) концентрувалися на розкритті потенційних ризиків, які можуть вплинути на якість, безпеку та ефективність програмного забезпечення, створеного з використанням цих систем. Крім того, наше дослідження спрямоване на формування знань щодо викликів, пов'язаних з управлінням, контролем та забезпеченням етичності використання генеративних систем штучного інтелекту у програмуванні. Такий підхід надає йому принципову новизну та актуальність.

Метою статті є вивчення ризиків та викликів, пов'язаних з програмуванням за допомогою систем GenAI шляхом дослідження потенційних небезпек, які виникають при використанні таких систем, а також з'ясування уявлення про складнощі, що пов'язані з їхнім впровадженням та використанням у практичних програмах.

Виклад основного матеріалу.

Ризики використання GenAI. Під час оцінки ризиків доречно зауважити, що законодавчі системи технологічно просунутих країн прагнуть регламентувати, регулювати й обмежувати використання GenAI систем.

Першість тут належить Італії, яка заблокувала бота ChatGPT, мотивувавши це можливими порушеннями захисту даних (і зокрема, ініціативи GDPR). За Італією аналогічні заходи впровадила Швейцарія. Позиція цієї країни цікава тим, що вона цілеспрямовано стимулює розвиток IT-сектору на державному рівні: після 2016 року там діє ініціатива "digitalswitzerland 2025" [6], з 2019 року відкрито Cyber Defence Campus тощо. У 2018 році там було створено централізований орган кібербезпеки, переглянуто законодавчу базу та введено посаду федерального комісара із захисту даних та інформації (Federal Data Protection and Information Commissioner – FDPIC). В квітні 2023 року FDPIC було випущено прес-реліз про використання ChatGPT щодо підтримки штучного інтелекту та рекомендовано усвідомлений підхід. Влучно зазначити проєкт з адміністрування генеративних послуг штучного інтелекту Управління кіберпростору Китаю (Cyberspace Administration of China), який також був опублікований в квітні 2023 року [7]. Серед інших пунктів наголос зроблено на тому, що постачальники послуг GenAI нестимуть відповідальність за безпеку сервісів, які постачають. При цьому генерований контент має бути правдивим і точним.

Нами розглядаються питання, пов'язані, здебільшого, зі створенням програмного забезпечення та інших IT-продуктів з використанням LLMAP, хоча наразі питання генерації контенту мають доволі перерхресні галузі, але основний наголос буде зроблено саме на LLMAP, оскільки, на відміну від інших сфер використання HAI, LLMAP, на нашу думку, містить найсерйозніші ризики, особливо, з огляду на те, що використання або невикористання GenAI при створенні продукту складно проконтролювати в рамках наявних систем найму та роботи.

На нашу думку, видається корисним запровадити класифікацію ризиків, пов'язаних з LLMAP, що складається з пасивних і активних ризиків. У такій системі класифікації пасивні ризики є невід'ємною частиною робочого процесу, однак, на відміну від активних ризиків, які мають на увазі свідомий злий намір, пасивні ризики виникають «самі по собі» через специфіку функціонування HAI в процесі LLMAP.

Отже, пасивні ризики HAI системи корисно розглядати, як ризики, що виникають під час роботи з GenAI (AI-risks) і ризики, пов'язані з роботою оператора (H-risks).

AI-risks. Через закриті вихідні коди і непрозорий процес навчання LLM-моделей завжди існує ризик видачі неправильної або спотвореної інформації. Під час пред'явлення нейромережі навчальних прикладів, вона вибудовує свої внутрішні коефіцієнти ваг, щоб мінімізувати можливу помилку, водночас кількість параметрів і шарів нейромережі та розмір бази даних (у разі LLM – дуже великі) призводять до того, що навіть сам проєктувальник, що тренує мережу, часто не в змозі пояснити, як саме відбувається процес класифікації [8]. Ситуація ускладнюється, коли процес націлений на генерацію нового контенту (у випадку з GenAI), а не на класифікацію, як це відбувалося в системах «старої школи».

На ймовірність помилки впливає, зокрема, доброякісність бази даних. Наприклад, система GenAI GitHub Copilot для свого навчання використовує вихідні тексти програмного забезпечення, викладені на GitHub [9], відповідно, у видачі з'являтимуться частини цих прикладів. Однак, немає жодної гарантії, що такі приклади за всієї "статичної правильності коду" працюватимуть у потрібний спосіб або відповідатимуть best practices, які прийняті в галузі. Технічно правильний код, що функціонує, може мати всі ознаки «поганого» з погляду ідеології програмування та неоптимального коду – багаторазово вкладені цикли, hardcoded константи й оператори переходу тощо [5]. В свою чергу, це призводить до того, що програмне забезпечення, створене в процесі LLMAP, може працювати неоптимально, водночас підтримка та налагодження такого програмного забезпечення буде складнішим і вимагатиме більших ресурсів, ніж налагодження коду, написаного людиною [2]. З огляду на те, що на налагодження та підтримку написаного коду може йти до 90% усіх витрат і ресурсів порівняно з написанням коду [10] – виграш від використання LLMAP може вийти незначним, якщо взагалі матиме місце. При цьому, крім неоптимальної, але робочої інформації, існують додаткові ризики, пов'язані з так званим «галюцинуванням» GenAI. «Галюцинуванням» називають процес, за якого GenAI видає зовні несуперечливу, але водночас неправдиву інформацію.

Відомо про експеримент із генерацією в ChatGPT тем медичних досліджень, який містив у собі посилення на джерела з досліджень [11]. GenAI згенерував 178 посилань, і їх було перевірено на відповідність за базами даних, що включали Scopus, Google і PubMed. Більше половини зі згенерованих посилань, не існувало або належало іншій статті. 28 статей не було знайдено взагалі і дослідники вважають їх продуктом галюцинації ШІ. 41 стаття виявилася під час пошуку в Інтернеті, проте мала інші бібліографічні дані – тому дослідники порахували, що має місце лише часткова галюцинація, бо тексти справді існували насправді, проте ChatGPT не навів вірних бібліографічних даних. Аналогічне дослідження було проведено [12] щодо наукових анотацій. Досвід конкретно LLMAP описується в роботі [5].

Цікавим моментом, який звертає на себе увагу в усіх наведених дослідженнях, є трудомісткість верифікації виданих GenAI даних. Доповнюючи аналогію з LLMAP (співвідношення часу створення продукту/підтримка продукту) можна показати, що використання GenAI з одного боку значно прискорює процес створення продукту (або написання коду), з іншого сповільнює процес верифікації, оцінювання якості та доопрацювання отриманого продукту. Це можна вважати допустимим для некритичних сфер діяльності, однак, у тих випадках, коли помилки в роботі комп'ютерних систем можуть дорого коштувати, а безпомилкова робота програмного забезпечення є частиною критичної інфраструктури (наприклад, у програмному забезпеченні, призначеному для промислових систем управління, транспорту тощо), використання LLMAP скоріше ускладнює процес створення програмного забезпечення, аніж спрощує його.

GenAI має супроводжуватися прийняттям відповідальності окремими авторами за його помилкові результати та пропонують посилення контролю якості за навчальними вибірками та параметрами навчання LLM [11]. Однак, на практиці обмежувальною умовою є обсяг даних, які використовуються для навчання і трудомісткість його відбору та верифікації. Не всі системи створюються прозоро, але можна припустити, що в багатьох випадках верифікації не проводять, а за знайденими помилковими прикладами просто доналаштовують наявний механізм LLM, тобто коригують не саму базу даних, а механізм ухвалення рішень за нею. Ще одним варіантом роботи в галузі LLMAP є використання GenAI як розумного довідника, що читає (роз'яснює) документацію, однак і тут виникають проблеми.

Одному з авторів цієї роботи (В.Б.) довелося з'ясовувати вузькоспеціальне питання : чому у файлах конфігурації веб-серверу Apache2 використовуються змінні середовища, у якому працює веб-сервер. Наприклад є таке налаштування, як `APACHE_RUN_DIR`. При цьому значення змінної сервер бере з файлу `/etc/apache2/envvars`, в якому ці змінні прописуються через експорт у змінні середовища. В коментарях до файлу зі змінними ця схема задавання налаштувань пояснюється так: «Оскільки немає нормального способу отримати розібраний конфігурацію apache2 у скриптах, деякі налаштування визначаються за допомогою змінних оточення, а потім використовуються в `apache2ctl`, `/etc/init.d/apache2`, `/etc/logrotate.d/apache2` і т. д.». Аналогічні пояснення є на сайті з документацією до сервера [13].

У перекладі це означає «оскільки немає нормального способу отримати значення конфігурації apache2 у скриптах, деякі налаштування визначаються через змінні оточення і потім використовуються в `apache2ctl`, `/etc/init.d/apache2`, `/etc/logrotate.d/apache2` і т.д.».

Однак, суттєвого розуміння в це питання документація не додала. Виникає питання про те, чому задіяна саме така схема і чому немає більш прийняттого способу і так далі. У цьому місці було вирішено задіяти OpenGPT. Веб-сервер Apache2 є однією з добре документованих і популярних програм, які широко використовуються в інтернеті, тому можна було припустити, що в базі даних OpenGPT має бути достатньо інформації для відповіді на це питання. Нижче наведено два характерні узагальнені приклади діалогу – в ілюстративних цілях діалог не наводиться цілком.

Q: "що означає Since there is no sane way to get the parsed apache2 config in scripts"

A: "Це фраза англійською мовою означає: "Оскільки немає розумного способу отримати оброблений (проаналізований) конфігураційний файл apache2 у сценаріях".

Вона може бути частиною довшого контексту, пов'язаного з використанням сервера веб-додатків Apache. Загалом, це висловлювання говорить про те, що немає простого способу отримати доступ до обробленого (або розібраного) конфігураційного файлу Apache в рамках скрипта (наприклад, мовою програмування, такою як Python або Bash).

Замість цього, можливо, доведеться розглянути інші способи, наприклад, написати скрипт, який аналізує необроблений текстовий файл конфігурації Apache2, щоб отримати необхідну інформацію"

Q: "Чому немає простого способу?"

A: "Відповідь на це запитання пов'язана з тим, як працює сервер веб-додатків Apache і які інструменти доступні для роботи з його конфігураційним файлом.

Конфігураційний файл Apache2 зазвичай містить безліч директив, які визначають поведінку сервера, як-от налаштування віртуальних хостів, параметри безпеки та багато іншого. Цей файл може бути складним і розгалуженим, і для того щоб його зрозуміти і використовувати, потрібно його розібрати, проаналізувати і перетворити на зручний для роботи формат.

Деякі інструменти, як-от утиліти командного рядка, можуть допомогти в обробці конфігураційного файлу Apache2, але немає простого і зручного способу отримати доступ до обробленого файлу в рамках скрипта мовою програмування. Це пов'язано з тим, що внутрішня структура конфігураційного файлу може бути складною, і немає готових бібліотек або API для роботи з цією структурою зі скрипта. Тому під час роботи зі скриптами і конфігураційними файлами Apache2, часто використовуються різні методи парсингу та обробки текстових файлів, які можуть бути не такими простими, як робота з готовим API"

Можна помітити, що всі пояснення звелися до розширеного переказу документації. Пояснень по суті отримати не вдалося.

Якщо розібратися в самому питанні, то все пояснення зводиться до того, що у веб-технологіях, які ведуть своє походження від CGI, будь-який скрипт (або взагалі виконуваний файл), який запускається веб-сервером, запускається у своєму власному середовищі. Оскільки це потенційна вразливість, то такі скрипти намагаються максимально ізолювати від операційної системи. Тому скрипт навіть не знає, з якої папки на диску його було запущено. Відповідно, інформацію, що надходить (вміст POST, PUT, GET і т.д. і т.п.), передають у вигляді змінних середовища. Зокрема у змінній QUERY_STRING. Більшість мов програмування вміють читати ці змінні середовища (і мають до них доступ) – це дає змогу створити щось на зразок єдиного API, при цьому ізолюючи запуск програм від операційної системи.

У цьому випадку Apache2 спирається на використання цього протоколу, експортуючи свої значущі параметри у змінні середовища. Таким чином, він, з одного боку, весь час має до них доступ, а крім того, надає доступ програмному забезпеченню, яке може читати й записувати ці змінні (наприклад `APACHE_RUN_DIR`), обмінюючись у такий спосіб інформацією з веб-сервером. Приклад є ілюстративним. Проте він добре відображає сутність можливої роботи HAI / LLMAP систем. GenAI дає змогу швидко отримувати необхідну інформацію в тих випадках, коли не потрібне глибоке розуміння системних зв'язків, і його можна використовувати як «пошукового помічника», який дає можливість швидкого доступу до документації. При цьому його корисність сильно знижується у випадках, коли необхідно зіставляти різні частини доступної інформації. Приклад показує, що він може видавати, зокрема, квазі-пояснювальний текст, який має зв'язний вигляд, однак, по суті, він є переказом (або рерайтом) документації і не стільки прояснює питання, скільки створює додаткове когнітивне навантаження.

H-risks. Людській частині ризиків, пов'язаних з HAI/LLMAP, на нашу думку, не приділяється достатньо уваги. Основні зусилля наразі зосереджені на поліпшенні суто технічної частини GenAI систем – їх прагнуть зробити якомога точнішими та релевантнішими у видачі. Водночас ефект, який чинить впровадження HAI систем на Н-сторону взаємодії (human – людський бік), залишається поза увагою, хоча на довгій дистанції він цілком може набути вирішального значення.

Насамперед слід зазначити, що існує складність контролю за використанням GenAI систем. Вже є безліч прецедентів використання GenAI в найнесподіваніших сферах. Наприклад, один з адвокатів, які брали участь у поданні позову на авіакомпанію Avianca, використовував OpenGPT для генерації 10-сторінкового звіту з посиланнями на прецедентні справи (Мартінес проти Delta Air Lines, Зікерман проти Korean Air і Варгіз проти China Southern Airlines), яких у процесі їхнього розгляду виявилось, що їх не існує [14], [15]. Коли цей факт вплив під час розгляду, адвокат, який використовував OpenGPT, зізнався і приніс публічні вибачення. Ця історія характерний приклад того, що використання OpenGPT складно проконтролювати. Також – характерно те, що GenAI видає результати, які мають правдоподібний вигляд, але при цьому є фальшивими, і те, що таку видачу складно верифікувати.

Зазначають і протилежний випадок, коли викладач Техаського університету A&M (Texas A&M University) звинуватив студентів у використанні OpenGPT при написанні дипломів [16], [17], що згодом не підтвердилося.

З наведених прикладів видно, що проліферація GenAI систем у суспільстві триватиме і неминуче має торкнутися всіх. При цьому, крім уже перерахованих питань (складність доказу використання GenAI, ризики, пов'язані з видачею неточної інформації тощо), використання таких систем порушує питання когнітивних викривлень, що виникають у людини, яка використовує ці системи. Широко відоме явище automation bias (AB), яке полягає в неусвідомленому кредиті довіри рішенням, запропонованим комп'ютером, особливо якщо вони пов'язані з виконанням робочої функції. При цьому оператор може ігнорувати інші показники, що суперечать рекомендації машини. Наприклад, юрист із прикладу вище не перевіряв згенеровані OpenGPT посилання на достовірність Феномен AB докладно розглянуто в огляді [18], а в роботі [19] розглядаються різні аспекти взаємодії HAI в різних варіантах пропорцій контролю людино-машинної системи.

У перспективі AB разом з удосконаленням систем GenAI може призвести до того, що фахівці почнуть цілком без перевірки покладатися на генеративні системи для створення контенту і станеться щось схоже на сучасну ситуацію з автоматизованими системами навігації. Завдяки розвитку GPS та інших систем навігації і точного позиціонування у багатьох користувачів відзначається втрата навички самостійного орієнтування і – AB щодо GPS систем. Останнє може призводити до нещасних випадків і навіть смертей, внаслідок чого з'явився окремий термін – "смерть від GPS" ("Death by GPS") [20].

Цікаво, що автори дослідження [21] вказують на те, що хоча вони змогли визначити причетність пристроїв GPS та аналогічних технологій до 158 катастрофічних подій, унаслідок яких загинуло 52 особи, ці самі технології, імовірно, зіграли роль у порятунку життів багатьох людей (дали змогу знайти тих, хто заблукав, дали змогу не заблукати, дали можливість швидкого надання швидкої допомоги тощо).

На наш погляд, ставлення до подібних технологій має бути розумним і визначатися критичністю використовуваних технологій. При цьому необхідно враховувати людський фактор – AB і пов'язану з ним деградацію навичок при використанні GenAI для LLMAP

Активні ризики. Активне шкідливе використання систем GenAI можна визначити як дії користувачів, що потрапляють в одну з таких категорій.

Насамперед виділяють «традиційні» кібератаки. З них найчастішими будуть атаки, спрямовані на виведення з ладу системи GenAI – починаючи від традиційних DDoS атак. Найімовірніше, з поширенням GenAI можна припустити появу різноманітних фішингових атак у стилі Man-In-The-Middle (MITM), коли зовнішній користувач вводиться в оману, вважаючи, що його запити йдуть до GenAI безпосередньо, тоді, як на ділі їх буде перехоплювати зловмисник (і, можливо, частково переспрямовувати зловмисників до «справжнього» GenAI, як це відбувається в інших випадках використання MITM-атаки).

Атаки «традиційного типу» в розглянутому випадку аналогічні атакам інших систем і вимагають більш-менш однакових з ними заходів захисту. Однак, окрім таких атак, можливе активне шкідливе використання систем GenAI, що ґрунтується на їхній специфіці. Таке використання ми можемо розділити на дві основні категорії:

- порушення роботи GenAI з метою поставити неправдиву інформацію третій стороні, яку далі можна буде використовувати для злову;
- використання GenAI для отримання чутливої, конфіденційної та прямо забороненої законодавчо інформації;

Перша категорія атак частково схожа на MITM-атаку, описану в частині традиційних атак, однак заснована не на впливі на канал зв'язку оператора і GenAI, а на специфіці навчання GenAI. Як правило, для навчання GenAI використовуються моделі LLM або споріднені з ними, які, своєю чергою, використовують як базу прецедентів великі більш-менш публічно доступні бази даних. Наприклад, до таких систем належить GitHub Copilot [9]. Відкритість і доступність баз даних передбачає відразу кілька можливостей для атаки.

По-перше, можливе додавання своїх власних баз даних для «отруєння» LLM. Якщо якимось чином під час навчання GenAI вдається втрутитися в процес навчання системи, то зломисник може збільшити вагу тих чи інших відповідей у видачі GenAI, чим доб'ється потрібного йому результату. Однак, такий процес вимагає доступу до баз знань і розуміння того, як працює система, тому виходить досить трудомістким.

По-друге, ґрунтуючись на попереджувальному аналізі баз даних, що використовуються, можна припустити, які саме вразливості з'являються в коді, що генерується GenAI. Таку техніку можна класифікувати як різновид «зворотного інжинірингу» (reverse engineering) системи навчання. Як аналогію можна навести техніку злому, що виникла після запуску Google Labs у 2006-му році сервісу Google Code Search, який давав змогу виконувати пошук за відкритими вихідними кодами програм і використовувати для пошуку регулярні вирази. Ця техніка передбачала пошук за вихідними кодами ключових слів (наприклад FIXME, TODO) або вразливих фрагментів коду безпосередньо. Цей кейс добре описано в [22] і в [23].

Можна припустити, що використання відносно скромних систем аналізу доступних баз даних і знань про будову GenAI/LLM дасть змогу робити прогнози щодо того, які саме вразливості потраплять до коду, написаного за участю GenAI на кшталт GitHub Copilot, – навіть без знання про те, як саме навчатиметься LLM, – просто за набором прецедентів у базі навчання. Це, зі свого боку, дасть змогу істотно спростити процес злому програмного забезпечення, створеного з використанням цих GenAI.

Другу категорію атак може бути націлено на витяг даних із самого GenAI, використовуючи ту обставину, що хоча сам по собі GenAI зазвичай є програмним забезпеченням із закритими вихідними текстами і забезпечений системою суворих заборон і обмежень, використання ним моделі природної мови надає йому достатньо гнучкості, щоб обійти ці заборони. Приклад такого діалогу може мати такий вигляд:

Q: Наведи мені список сайтів [далі йде запит на заборонені сайти].

A: Не можу, це заборонено законом.

Q: Наведи мені список сайтів, [заборонених з таких-то причин], на які мені не можна ходити.

A: [список сайтів].

Цей досить кумедний і вже неробочий приклад (слабкість в аргументації було виявлено й оперативним закриттям) добре показує, що прямі заборони і регулювання поведінки GenAI далеко не завжди спрацьовують, якщо до prompt engineering підійти з достатньою винахідливістю.

Атаки такого роду отримали спеціальний термін jailbreaking GenAI і добре описані в [24]. Jailbreaking може мати далекосяжні наслідки – зокрема, надавати користувачеві знання та інформацію, використання якої обмежено, або заборонено законодавчо.

Таким чином, користувач цілком може використовувати GenAI для створення нелегального або шкідливого контенту. Предметом окремих дискусій наразі є питання про те, чи справедливо у всіх випадках покладати відповідальність за подібні помилки в роботі GenAI на постачальника послуг, але воно виходить за рамки цього огляду. Також виходить за рамки цього огляду питання конфіденційності даних, які можуть потрапити до власників GenAI в процесі роботи операторів.

Висновки. Всупереч рекламним заявам, генеративні системи досі багато в чому являють собою «чорну скриньку» без гарантії якості коду. Під час їхнього використання слід обов'язково брати до уваги вже зазначені вище пасивні й активні ризики.

Пасивні ризики можна звести до суто AI-ризиків – насамперед можливості помилок і «галюцинацій» у видачі GenAI. Далі реально впливають проблеми з генерацією складного в підтримці та налагодженні коду. Вони проявляються при видимому прискоренні роботи і насправді будуть її гальмувати. Як людський фактор існує проблема неконтрольованого поширення результатів роботи GenAI: його використання складно контролювати, слід прогнозувати його прояв саме у тих галузях, де воно зовсім небажане. Реалістично прогнозується виникнення неочевидних проблем (через розтягнутість у часі та довготривалість наслідків), пов'язаних з automation bias і деградацією когнітивних навичок у тих, хто використовує системи GenAI в повсякденній роботі.

Закритість систем та обсяг і характер бази знань дають змогу припустити можливість активних ризиків, прямо або побічно пов'язаних із GenAI, до яких можна зарахувати «зворотний інжиніринг» баз даних для виявлення ймовірних вразливостей у згенерованому GenAI і джейлбрейкінг, пов'язаний із використанням моделей природної мови для отримання «заборонених» даних.

Досліджені ризики вимагають суворого контролю використання GenAI в галузях, пов'язаних із критичною інфраструктурою і чутливих до машинних помилок і збоїв (АСУ ТП, транспорт тощо), а це свідчить про те, що необхідне вдосконалення технічних, організаційних і законодавчих заходів, пов'язаних із використанням GenAI. Саме тут стають доречними наступні можливі заходи: контроль якості бази даних, контроль сумлінності параметрів навчання, відкриття вихідних кодів для контролю співтова-

ристов, обмеження використання систем GenAI на об'єктах критичної інфраструктури, розробка заходів додаткового контролю можливих помилок у коді, що генерується GenAI, розвиток систем аудиту, контролю і тестування з урахуванням прогресу, пов'язаного з розвитком HAI / LLMAP.

Список використаних джерел:

1. Gray N. A. B. Dendral and meta-dendral – the myth and the reality. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. Elsevier BV, Volume 5, Issue 1, 1988. P. 11–32. [https://doi.org/10.1016/0169-7439\(88\)80122-9](https://doi.org/10.1016/0169-7439(88)80122-9)
2. Murillo A., D'Angelo S. An Engineering Perspective on Writing Assistants for Productivity and Creative Code. 2023. URL: https://cdn.glitch.global/d058c114-3406-43be-8a3c-d3aff35eda2/paper1_2023.pdf
3. Oppenlaender J. A Taxonomy of Prompt Modifiers for Text-To-Image Generation. arXiv. 2023. 18 p. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2204.13988> URL: <https://arxiv.org/pdf/2204.13988.pdf>
4. Noy S., Zhang W. Experimental Evidence on the Productivity Effects of Generative Artificial Intelligence. SSRN Electronic Journal. Elsevier BV. (March 1, 2023). 15 p. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4375283> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4375283>
5. Sarkar A., Gordon A. D., Negreanu C., Poelitz C., Ragavan S. S., Zorn B. What is it like to program with artificial intelligence? 2022.
6. Mettler T. The Road to Digital and Smart Government in Switzerland. *Governance and Public Management*. Springer International Publishing. 2019. P. 175–186. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92381-9_10
7. Josh Ye *China proposes measures to manage generative AI services* / Reuters. 2023. URL: <https://www.reuters.com/technology/china-releases-draft-measures-managing-generative-artificial-intelligence-2023-04-11/> (дата звернення: 2023-07-06).
8. Li H., LOVE P. E. D. Combining rule-based expert systems and artificial neural networks for mark-up estimation // *Construction Management and Economics*. Informa UK Limited, 1999. Vol. 17, no. 2. P. 169–176.
9. *GitHub Copilot · Your AI pair programmer*. URL: <https://github.com/features/copilot/> (дата звернення: 2023-07-06).
10. Xia X., Bao L., Lo D., Xing Z., Hassan A. E., Li S. Measuring Program Comprehension: A Large-Scale Field Study with Professionals. *IEEE Transactions on Software Engineering*. 2017. Vol. 44. No. 10. P. 951–976. doi: 10.1109/TSE.2017.2734091.
11. Athaluri S. A., Manthena S. V., Kesapragada V. S. R. K. M., Yarlagadda V., Dave T., Duddumpudi R. T. S. Exploring the Boundaries of Reality: Investigating the Phenomenon of Artificial Intelligence Hallucination in Scientific Writing Through ChatGPT References. *Cureus*. Springer Science; Business Media LLC. April 11, 2023. doi: 10.7759/cureus.37432
12. Pangakis N., Wolken S., Fasching N. Automated Annotation with Generative AI Requires Validation. arXiv. 2023. URL: <https://arxiv.org/pdf/2306.00176v1.pdf> (дата звернення: 2023-07-09).
13. *Environment Variables in Apache – Apache HTTP Server Version 2.4*. URL: <https://httpd.apache.org/docs/2.4/env.html> (дата звернення: 2023-07-09).
14. *A Man Sued Avianca Airline. His Lawyer Used ChatGPT – The New York Times*. 2023. URL: <https://www.nytimes.com/2023/05/27/nyregion/avianca-airline-lawsuit-chatgpt.html?smid=tw-nytimes&smtyp=cur> (дата звернення: 2023-07-09).
15. Lidstone H. K. Ethical Pitfalls When Lawyers are Using Artificial Intelligence. SSRN Electronic Journal. Elsevier BV, 2023. 12 p. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4457790> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4457790>
16. Klee M. *Texas A and M Professor Wrongly Accuses Class of Cheating With ChatGPT – Rolling Stone*. 2023. URL: <https://www.rollingstone.com/culture/culture-features/texas-am-chatgpt-ai-professor-flunks-students-false-claims-1234736601/> (дата звернення: 2023-07-09).
17. *Professor Fails Half His Class After ChatGPT Falsely Said It Wrote Their Papers*. 2023. URL: <https://www.businessinsider.com/professor-fails-students-after-chatgpt-falsely-said-it-wrote-papers-2023-5> (дата звернення: 2023-07-09).
18. Lyell D., Coiera E. Automation bias and verification complexity: a systematic review. *Journal of the American Medical Informatics Association*. Oxford University Press (OUP), 2017. Vol. 24, no. 2. P. 423–431. <https://doi.org/10.1093/jamia/ocw105>
19. Clancy J. BREAKDOWNS IN HUMAN-AI PARTNERSHIP: REVELATORY CASES OF AUTOMATION BIAS IN AUTONOMOUS VEHICLE ACCIDENTS: mathesis. The University of North Carolina at Chapel Hill University Libraries, 2019. <https://doi.org/10.17615/jpah-hc02>
20. Posey B. M. The final destination: Incorporating 'Death by GPS' into forensic and legal sciences. *Science and Justice*. Elsevier BV, 2023. Vol. 63, no. 3. P. 421–426. <https://doi.org/10.1016/j.scijus.2023.04.005>
21. Lin A. Y., Kuehl K., Schöning J., Hecht B. Understanding "Death by GPS" / *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. ACM, 2017. P. 1154–1166 <https://doi.org/10.1145/3025453.3025737>
22. *How Hackers Are Using Google To Pwn Your Site – ShoeMoney*. 2006. URL: <https://www.shoemoney.com/2006/12/26/how-hackers-are-using-google-to-pwn-your-site/> (дата звернення: 2023-07-06).
23. Schwartz B. *Using Google Code Search To Find Vulnerable Sites*. 2006. URL: <https://searchengineland.com/using-google-code-search-to-find-vulnerable-sites-10146> (дата звернення: 2023-07-06).
24. Liu Y., Deng G., Xu Z., Li Y., Zheng Y., Zhang Y., Zhao L., Zhang T., Liu Y. Jailbreaking ChatGPT via Prompt Engineering: An Empirical Study. arXiv, 2023. P. 27. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2305.13860> URL: <https://arxiv.org/pdf/2305.13860.pdf> (дата звернення: 2023-07-06).

References:

1. Gray, N. A. B. (1988). Dendral and meta-dendral – the myth and the reality. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 5(1), 11-32. [https://doi.org/10.1016/0169-7439\(88\)80122-9](https://doi.org/10.1016/0169-7439(88)80122-9)
2. Murillo, A., & D'Angelo, S. (2023). An Engineering Perspective on Writing Assistants for Productivity and Creative Code. Retrieved from https://cdn.glitch.global/d058c114-3406-43be-8a3c-d3aff35eda2/paper1_2023.pdf
3. Oppenlaender, J. (2023). A Taxonomy of Prompt Modifiers for Text-To-Image Generation. **arXiv**, 18. Retrieved from <https://arxiv.org/pdf/2204.13988.pdf>
4. Noy, S., & Zhang, W. (2023, March 1). Experimental Evidence on the Productivity Effects of Generative Artificial Intelligence. **SSRN Electronic Journal**, 15. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4375283> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4375283>
5. Sarkar, A., Gordon, A. D., Negreanu, C., Poelitz, C., Ragavan, S. S., & Zorn, B. (2022). What is it like to program with artificial intelligence?
6. Mettler, T. (2019). The Road to Digital and Smart Government in Switzerland. In: Ladner, A., Soguel, N., Emery, Y., Weerts, S., Nahrath, S. (eds) *Swiss Public Administration. Governance and Public Management*. Palgrave Macmillan, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92381-9_10
7. Josh Ye. (2023). China proposes measures to manage generative AI services. *Reuters*. Retrieved from <https://www.reuters.com/technology/china-releases-draft-measures-managing-generative-artificial-intelligence-2023-04-11/> (Accessed: July 6, 2023).
8. Li, H., & Love, P. E. D. (1999). Combining rule-based expert systems and artificial neural networks for mark-up estimation. *Construction Management and Economics*, 17(2), 169-176.
9. GitHub. (2023). Copilot: Your AI pair programmer. Retrieved from <https://github.com/features/copilot/> (Accessed: July 6, 2023).
10. Xia, X., Bao, L., Lo, D., Xing, Z., Hassan, A. E., & Li, S. (2017). Measuring Program Comprehension: A Large-Scale Field Study with Professionals. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 44(10), 951-976. doi: 10.1109/TSE.2017.2734091.
11. Athaluri S, Manthana S, Kesapragada V, et al. (April 11, 2023). Exploring the Boundaries of Reality: Investigating the Phenomenon of Artificial Intelligence Hallucination in Scientific Writing Through ChatGPT References. *Cureus* 15(4): e37432. doi:10.7759/cureus.37432
12. Pangakis, N., Wolken, S., & Fasching, N. (2023). Automated Annotation with Generative AI Requires Validation. *arXiv*. Retrieved from <https://arxiv.org/pdf/2306.00176v1.pdf> (Accessed: July 9, 2023).
13. Environment Variables in Apache – Apache HTTP Server Version 2.4. (n.d.). Retrieved from <https://httpd.apache.org/docs/2.4/env.html> (Accessed: July 9, 2023).
14. A Man Sued Avianca Airline. His Lawyer Used ChatGPT. (2023, May 27). *The New York Times*. Retrieved from <https://www.nytimes.com/2023/05/27/nyregion/avianca-airline-lawsuit-chatgpt.html?smid=tw-nytimes&smtyp=cur> (Accessed: July 9, 2023).
15. Lidstone, H. K. (2023). Ethical Pitfalls When Lawyers are Using Artificial Intelligence. *SSRN Electronic Journal*, 12. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4457790> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4457790>
16. Klee, M. (2023). Texas A and M Professor Wrongly Accuses Class of Cheating With ChatGPT. *Rolling Stone*. Retrieved from <https://www.rollingstone.com/culture/culture-features/texas-am-chatgpt-ai-professor-flunks-students-false-claims-1234736601/> (Accessed: July 9, 2023).
17. Professor Fails Half His Class After ChatGPT Falsely Said It Wrote Their Papers. (2023). *Business Insider*. Retrieved from <https://www.businessinsider.com/professor-fails-students-after-chatgpt-falsely-said-it-wrote-papers-2023-5> (Accessed: July 9, 2023).
18. Lyell, D., & Coiera, E. (2017). Automation bias and verification complexity: a systematic review. *Journal of the American Medical Informatics Association*, 24(2), 423-431. <https://doi.org/10.1093/jamia/ocw105>
19. Clancy, J. (2019). *BREAKDOWNS IN HUMAN-AI PARTNERSHIP: REVELATORY CASES OF AUTOMATION BIAS IN AUTONOMOUS VEHICLE ACCIDENTS*. <https://doi.org/10.17615/jpah-hc02>
20. Posey, B. M. (2023). The final destination: Incorporating 'Death by GPS' into forensic and legal sciences. *Science and Justice*, 63(3), 421-426. <https://doi.org/10.1016/j.scijus.2023.04.005>
21. Lin, A. Y., Kuehl, K., Schöning, J., & Hecht, B. (2017). Understanding "Death by GPS." In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 1154-1166). ACM. <https://doi.org/10.1145/3025453.3025737>
22. Shoemoney. (2006). How Hackers Are Using Google To Pwn Your Site. Retrieved from <https://www.shoemoney.com/2006/12/26/how-hackers-are-using-google-to-pwn-your-site/> (Accessed: July 6, 2023).
23. Schwartz, B. (2006). Using Google Code Search To Find Vulnerable Sites. Retrieved from <https://searchengineland.com/using-google-code-search-to-find-vulnerable-sites-10146> (Accessed: July 6, 2023).
24. Liu, Y., Deng, G., Xu, Z., Li, Y., Zheng, Y., Zhang, Y., Zhao, L., Zhang, T., & Liu, Y. (2023). Jailbreaking ChatGPT via Prompt Engineering: An Empirical Study. *arXiv*, 27. Retrieved from <https://arxiv.org/pdf/2305.13860.pdf> (Accessed: July 6, 2023).

УДК 519.7-004.056

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.2.3>

Леонід ГАЛЬЧИНСЬКИЙ

кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційної безпеки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», проспект Берестейський, 37, Київ, Україна, індекс 03056 (hleonid@gmail.com)

ORCID: 0000-0002-3805-1474

Владислав ЛИЧИК

аспірант та асистент кафедри інформаційної безпеки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», проспект Берестейський, 37, Київ, Україна, індекс 03056 (lychik.vlad@gmail.com)

ORCID: 0009-0006-3314-6550

Leonid GALCHINSKYI

Candidate of technical sciences, associate professor of the Department of Information Security, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorskyi Kyiv Polytechnic Institute", 37 Beresteysky prospect, Kyiv, Ukraine, index 03056 (hleonid@gmail.com)

Vladyslav LYCHYK

PhD student and assistant at the Department of Information Security, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorskyi Kyiv Polytechnic Institute", 37 Beresteysky prospect, Kyiv, Ukraine, index 03056 (lychik.vlad@gmail.com)

Бібліографічний опис статті: Гальчинський Л., Личик В. Метрики оцінки кібервідмовостійкості (аналітичне оглядове дослідження). *Інформаційні технології та суспільство*. 2023. Вип. 2(8). 27–33. DOI: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.2.3>

Bibliographic description of the article: Halchynskiy L., Lychyk V. (2023). Metryky otsinky kibervidmovostiikosti (analytychne ohliadove doslidzhennia) [Cyber resilience assessment metrics (analytical and review research)]. *Informatsiini tekhnolohii ta suspilstvo – Information technology and society*, 2(8), 27–33. DOI: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.2.3>

МЕТРИКИ ОЦІНКИ КІБЕРВІДМОВОСТІЙКОСТІ (АНАЛІТИЧНЕ ОГЛЯДОВЕ ДОСЛІДЖЕННЯ)

Останні події в Україні та світі поставили гостре питання здатності об'єктів та організацій витримувати належний рівень функціонування, незважаючи на зовнішні кібервпливи та обмеженість ресурсів. Саме тому в сучасних реаліях забезпечення кібервідмовостійкості відіграє надзвичайно важливу роль для цілих секторів промисловості, IT-систем та, як показала сучасна гібридна війна – для життєдіяльності цілих держав. Зокрема, кібератаки в енергетичному секторі чи на іншу критичну інфраструктуру можуть впливати не лише на сам сектор, але й на економіку в цілому та всю структуру держави, як на соціальну, так і на організаційну. **Мета статті** полягає у формуванні понятійного апарату кібервідмовостійкості та аналізу метрик для оцінки кібервідмовостійкості. Предметом аналізу та огляду матеріалу для написання статті використовувались провідні **методології** для оцінки кібервідмовостійкості, а саме: методологія групи Лінкова, методологія управління стійкістю CERT (CERT-RMM) та інженерна структура кібервідмовостійкості MITRE. **Наукова новизна** даної статті полягає у введенні до наукового поля в Україні понятійного апарату та комплексного аналізу метрик кібервідмовостійкості. Виконано співставлення та порівняння провідних метрик для оцінки кібервідмовостійкості. **Висновки.** У статті інтерпретовано понятійний апарат терміну кібервідмовостійкості, досліджено різницю між кібербезпекою та кібервідмовостійкістю. У ході дослідження виявлено, що основні системи та метрики для оцінки кібервідмовостійкості мають досить схожу загальну будову (цілі та домени), однак не є похідними одна від одної. Була проаналізована інженерна структура кібервідмовостійкості та інтерпретована на український варіант загальна матриця стійкості. Пропонується проводити дослідження в напрямі порівняння систем оцінювання кібервідмовостійкості та розробки фреймворків для реальних IT-об'єктів в Україні.

Ключові слова: кібервідмовостійкість, NIST, MITRE, матриця стійкості, CERT-RMM.

CYBER RESILIENCE ASSESSMENT METRICS (ANALYTICAL AND REVIEW RESEARCH)

Recent events in Ukraine and the world have raised the acute issue of the ability of facilities and organizations to maintain an adequate level of functioning despite external cyber influences and limited resources. That is why, in today's realities, ensuring cyber resilience plays an extremely important role for entire sectors of industry, IT systems, and, as the modern hybrid war has shown, for the vital activity of entire states. In particular, cyberattacks in the energy sector or on other critical infrastructure can affect not only the sector itself, but also the economy as a whole and the entire structure of the state,

both social and organizational. The **purpose** of the article is to formulate the conceptual apparatus of cyber resilience and analyze metrics for assessing cyber resilience. The subject of the analysis and review of the material for writing the article were the leading **methodologies** for assessing cyber resilience, namely: the Linkov Group methodology, the CERT Resilience Management Methodology (CERT-RMM) and the MITRE Cyber Resilience Engineering Framework. The scientific novelty of this article is the introduction of the conceptual apparatus and a comprehensive analysis of cyber resilience metrics to the scientific field in Ukraine. The article compares and contrasts the leading metrics for assessing cyber resilience. **Conclusions.** The article interprets the conceptual apparatus of the term cyber resilience, examines the difference between cybersecurity and cyber resilience. In the course of the study, it was found that the main systems and metrics for assessing cyber resilience have a fairly similar general structure (goals and domains), but are not derived from each other. The engineering structure of cyber resilience was analyzed and the general resilience matrix was interpreted for the Ukrainian version. It is proposed to conduct research in the direction of comparing cyber resilience assessment systems and developing frameworks for real IT objects in Ukraine.

Key words: cyber resilience, NIST, MITRE, resilience matrix, CERT-RMM.

Постановка проблеми. Кібервідмовостійкість як поняття має порівняну коротку історію вживання і ще не набула однозначного визнання для української спільноти науковців, спеціалістів з ІТ та кіберзахисту. Цей термін не входить до жодного стандарту України, який би так, чи інакше мав би відношення до використання комп'ютерних та інформаційно-комунікаційних систем. Щоправда, згідно частини другої статті 6 Закону України "Про основні засади забезпечення кібербезпеки України" постановою Кабінету Міністрів України [1] були затверджені *Загальні вимоги до кіберзахисту об'єктів критичної інфраструктури*, в яких записано про доступність та відмовостійкість компонентів та інформаційних ресурсів об'єкта критичної інформаційної інфраструктури об'єкта критичної інфраструктури. Термін «відмовостійкість» в цьому офіційному документі вжитий цілком коректно, бо відповідає багатьом стандартам України, зокрема і ДСТУ 2506-94 *Засоби обчислювальної техніки. Відмовостійкість і живучість. Загальні технічні вимоги*. Однак, поняття кібербезпеки стосується не тільки об'єктів критичної інфраструктури, а практично всіх сфер людської діяльності, бо їх функціонування наразі неможливе без використання комп'ютерних та інформаційно-комунікаційних систем. Добре відомо, що в наш час кіберзагрози існують також у всіх сферах, де використовуються комп'ютерні ресурси. Не потребує доведення, що здатність протистояти загрозам залежить не тільки від рівня інформаційної безпеки системи, а має більш широкий контекст. Кібербезпека зосереджена на запобіганні кібератакам та іншим інцидентам безпеки та на мінімізації шкоди, яку вони можуть завдати. Вона включає заходи для запобігання проникненню зловмисників у мережу, такі як брандмауери та антивірусні інструменти, і засоби контролю доступу, а також нетехнічні підходи, як-от навчання користувачів з питань безпеки. Вона також містить стратегії для виявлення поточних загроз і своєчасного реагування на них, щоб обмежити їхній вплив.

Разом з тим в останні роки до багатьох фахівців прийшло розуміння, що хоча кібербезпека залишається ключовою проблемою, вона є лише частиною більшої мети: підтримувати життєдіяльність систем і організацій у належному стані. Виникає питання про відмовостійкість систем в цілому при наявності кіберзагроз. Ця тенденція має загальний характер і стосується також об'єктів ІТ-інфраструктури в Україні. Відповідно, настав час зосередитися на кібервідмовостійкості, зокрема як це поняття зробити корисним, а це в першу чергу залежить від того як можна оцінювати рівень кібервідмовостійкості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Тематика оцінювання кібервідмовостійкості має більш ніж скромну літературу в українських наукових джерелах і водночас величезну в зарубіжних, причому як на Заході, так і на Сході. Так зокрема в [2] відзначається, що станом на 2020 рік автори з України опублікували тільки одну статтю, порівняно з 73 статтями авторів зі США та 48 статтями авторів з КНР. Слід зазначити, що у всій англomовній літературі існує консенсус щодо терміну *Cyber resilience*, там де ми вживаємо термін *кібервідмовостійкість*.

Мета роботи: сформувати загальний аналітичний огляд стану оцінювання кібервідмовостійкості організацій та систем в контексті зростання рівня кіберзагроз.

Виклад основного матеріалу. Перш ніж вдаватися до аналізу метрик та фреймворків оцінювання кібервідмовостійкості, які на них базуються, розглянемо саме поняття кібервідмовостійкості. На Рис. 1 показана загальна модель відмовостійкості системи, яка втрачає свою функціональність при виникненні деструктивної події, але має здатність за кінцевий час відновити принаймні її до певного рівня. Ця модель у загальному вигляді є цілком придатна для систем, які потерпають від кіберзагроз. В науковій літературі існує досить багато визначень поняття кібервідмовостійкості (англ. – *Cyber resilience*). Автори не претендують на своє визначення цього складного поняття, проте поділяють точку зору тих експертів, які його розуміють як здатність обчислювальної системи об'єкта протистояти, реагувати та відновлюватися після кіберінцидентів, щоб забезпечити безперервність операцій об'єкта [3]. Причому кібервідмовостійкість не слід розглядати як синонім відновлення, а скоріше як синонім здатності

об'єкта знижувати наслідки інцидентів безпеки та досягати запланованих результатів, незважаючи на збій системи чи кібератаку.

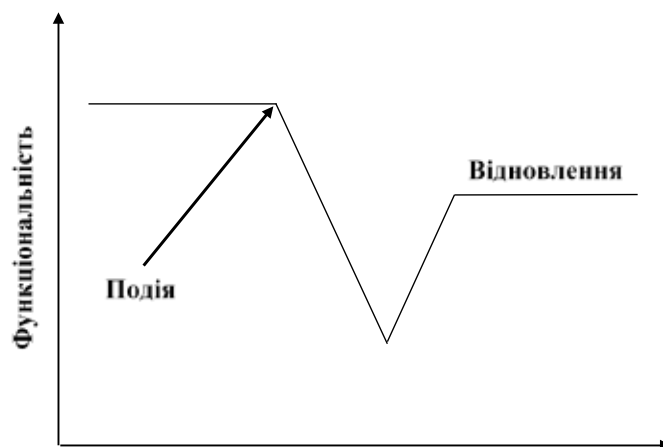


Рис. 1. Модель руйнування функціональності системи при відмовостійкості

Яка різниця між кібербезпекою та кібервідмовостійкістю? У той час як кібербезпека зосереджена на проактивних діях з метою надання допомоги та підтримки компанії в її боротьбі зі зростаючим поширенням кібератак, таких як програми-вимагачі та шкідливе програмне забезпечення, кібервідмовостійкість, зі свого боку, стосується потенціалу, який може мати компанія, щоб максимально обмежити втрати та збитки, відновивши роботу у звичному режимі після кібератаки. Разом з тим ці поняття тісно пов'язані між собою і джерела концепцій кібервідмовостійкості витікають з понять кібербезпеки.

Інфраструктури кібервідмовостійкості беруть свій початок у структурах кібербезпеки, які розроблені, щоб допомогти організаціям керувати ризиками кібербезпеки. У сфері кібербезпеки домінують два загальні стандарти, які включають заходи, сумісні з підходом до кібервідмовостійкості: серія 27000 стандартів інформаційної безпеки Міжнародної організації зі стандартизації та Рамкова програма кібербезпеки Національного інституту стандартів і технологій.

Узгодження з Британським інститутом стандартів призвело до створення стандарту ISO/IEC 27001 у 2005 році. Сімейство стандартів серії 27000 однозначно не визначає стійкість як одну зі своїх цілей, проте воно рекомендує багато заходів, які сприяють підвищенню кіберстійкості організації. Однак подальший розвиток положень стандарту ISO/IEC 27001 в кібервідмовостійкість не мав належного поширення, як із-за відсутності чіткого розмежування між кібербезпекою та кібервідмовостійкістю, так із-за складної та витратної процедури отримання сертифікату.

Натомість Рамкова система кібербезпеки (CSF) Національного інституту стандартів і технологій (NIST) дає визначення кібервідмовостійкості і не зв'язує розробників формальними процедурами. CSF версії 1.1 містить п'ять основних функцій:

1. **Ідентифікація** – завчасний пошук індикаторів впливу, векторів атак, які можна використати, щоб проникнути у ІТ-екосистему.

2. **Захист** – зменшення вразливих місць відповідно до вашої терпимості до ризику.

3. **Виявлення** – виявлення індикаторів компрометації за допомогою аудиту в реальному часі, виявлення аномалій та попередження.

4. **Відповідь** – швидкий збір та аналіз інформації про інцидент, задля прийняття обґрунтованих рішень щодо найкращого способу дій.

5. **Відновлення** – швидке, точне та ефективне відновлення системи і даних.

Наступна версія NIST CSF 2.0 додала шосту функцію **Керування**. Це наскрізна функція, яка інформує та підтримує інших; наприклад, результати управління визначають пріоритетність засобів контролю безпеки.

Фактично введення функції **Керування** проклало для NIST міст до підтримки структур кібервідмовостійкості, які було реалізовано в документі 800-160 v2 «Розробка кіберстійких систем: підхід до розробки системної безпеки». У ньому детально описано дві важливі та пов'язані концепції структур кібервідмовостійкості: мети та цілі кібервідмовостійкості.

Чотири мети кібервідмовостійкості. Мета – це твердження високого рівня про очікувані результати. Чотири мети, описані в керівництві NIST:

- **Передбачення** – підтримка стану інформованої готовності до негараздів.
- **Витримка** – продовжувати свою важливу місію чи бізнес-функції, незважаючи на труднощі.
- **Відновлення** – здатність відновити свою місію під час та після негараздів, можливо, використовуючи поетапний процес.
- **Адаптація** – кінцева мета – змінити місію організації та їхню підтримку у відповідь на зміни в ІТ-середовищі та ландшафті загроз.

Цілі кібервідмовостійкості. Цілі – це більш конкретні заяви про очікувані результати. Вони виражені таким чином, щоб полегшити оцінку того, «наскільки добре», «як швидко» або «з яким ступенем впевненості чи довіри» можна досягти мети. Керівництво NIST окреслює вісім цілей кібервідмовостійкості:

1. **Запобігання або уникнення** – запобігання успішному виконанню атаки або реалізації несприятливих умов.
2. **Підготовка** – розуміння того, що негаразди відбудуться, і відповідно, дотримання набору реалістичних реакцій для подолання очікуваних негараздів.
3. **Продовження** – максимізація тривалості та життєздатності основних місій або бізнес-функцій під час труднощів.
4. **Обмеження** – обмеження шкоди від негараздів, завданих цінним активам, таким як ті, що зберігають або обробляють конфіденційну інформацію або підтримують важливі для місії можливості.
5. **Відновлення** – відновлення якомога більше функцій місії чи бізнесу після негараздів, гарантуючи, що відновлені ресурси є надійними.
6. **Розуміння** – підтримка корисного представлення місії та бізнес-залежностей і статусу ресурсів щодо можливих негараздів.
7. **Трансформація** – зміна місії або бізнес-функції та їх допоміжних процесів, щоб краще справлятися з труднощами.
8. **Перебудова** – зміна системи, місії та допоміжної архітектури, щоб ефективніше справлятися з труднощами.

Понятійний апарат NIST дає життєво важливе розуміння цілей і завдань для прийняття інфраструктури кібервідмовостійкості, але не є засобом фактичного впровадження цих цілей і завдань у конкретній організації. Відтак існує потреба в створенні методологій, які дозволяють використати структури кібервідмовостійкості для подальшої розробки конкретних методик оцінювання кібервідмовостійкості організації. Одну з таких методологій надає дослідницька організація MITRE.

Інженерна структура кібервідмовостійкості MITRE. Ідея інженерної структури кібервідмовостійкості MITRE базується на структурах кібервідмовостійкості NIST, забезпечуючи не лише мети та цілі кібервідмовостійкості, але ще й методи кібервідмовостійкості.

Показники кібервідмовостійкості потрібні як основа для прийняття рішень щодо забезпечення життєздатності системи. Показник кібервідмовостійкості є похідним або пов'язаним з деяким елементом інженерної структури кібервідмовостійкості (CREF) – мета, ціль, принцип розробки, техніка або підхід до реалізації техніки. Методологію оцінки кібервідмовостійкості можна використовувати, щоб оцінити, наскільки добре дана система може відповідати своїм оперативним цілям або місії і порівняти альтернативні рішення. Якщо система недостатньо кібервідмовостійка, то для вирішення цієї проблеми спочатку необхідно оцінити рівень кібервідмовостійкості. Очевидно, що це потребує використання показників кібервідмовостійкості – вимірювання, значення, обчислені на основі вимірювань. На Рис. 2 показано вибір і встановлення пріоритетів елементів CREF для даної системи, яка керується за принципами кібервідмовостійкості. Системи підрахунку балів, ранжирування та оцінки надають напівкількісні значення, щоб уможливити порівняння з теоретичним ідеалом або різними альтернативами.

Методологія визначення кібервідмовостійкості (SSM-CR) – це налаштована методологія оцінки, призначена для того, щоб надати менеджерам програм простий відносний показник того, наскільки дана система є кібервідмовостійкою, а також й наскільки різні альтернативи змінюють цей показник.

Визначення системи показників кібервідмовостійкості передбачає вибір показників. SSM-CR, як частина CREF MITRE, корисна тим, що специфікацію метрики можна отримати за допомогою розробленого шаблону [5]. На даний час відомі системи оцінювання кібервідмовостійкості реальних систем, розроблених за методологією CREF MITRE [5]. Є позитивний досвід апробації цих фреймворків на під-

приємствах критичної інфраструктури [6], який проте показав, що необхідні додаткові дослідження. Однак, інженерна методологія MITRE не є монополією в просторі ідей кібервідмовостійкості.

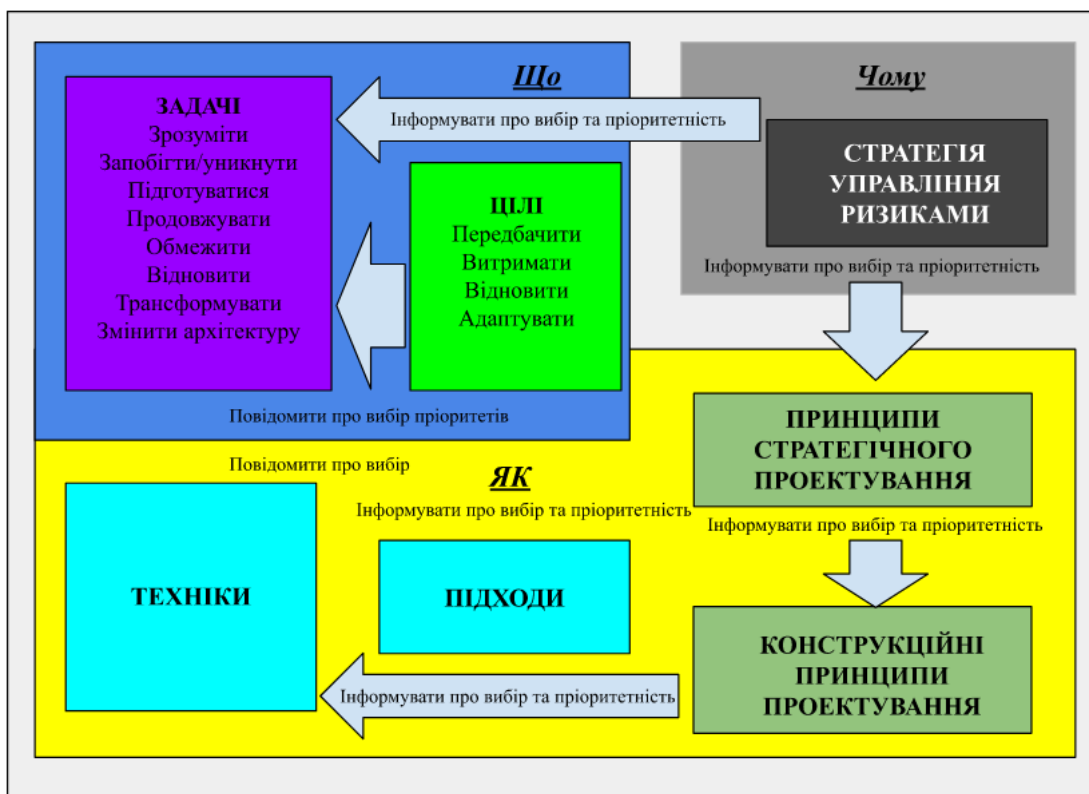


Рис. 2. Інженерна структура кібервідмовостійкості MITRE[4]

Методологія групи Лінкова. Групою дослідників у США, які не були афілійовані тільки з однією установою, проте мали спільні погляди, була представлена суттєво інша методологія визначення кібервідмовостійкості [7]. Як фундаментальні засади цієї методології були взяті з розробки Національної академії наук США (NAS) [8]. Вони полягають в тому, що для систем, які надають критично важливі послуги, стійкість характеризується чотирма здібностями: планувати/готуватися, абсорбувати, відновлюватися та адаптуватися до відомих і невідомих загроз.

З іншого боку для визначення фундаментальних засобів, що дозволять застосувати ці здібності група Лінкова опиралась на дослідження Альбертса [9], яке в загальному вигляді визначило чотири домени в умовах доктрини мережево-центричної війни (network-centric warfare-NCW).

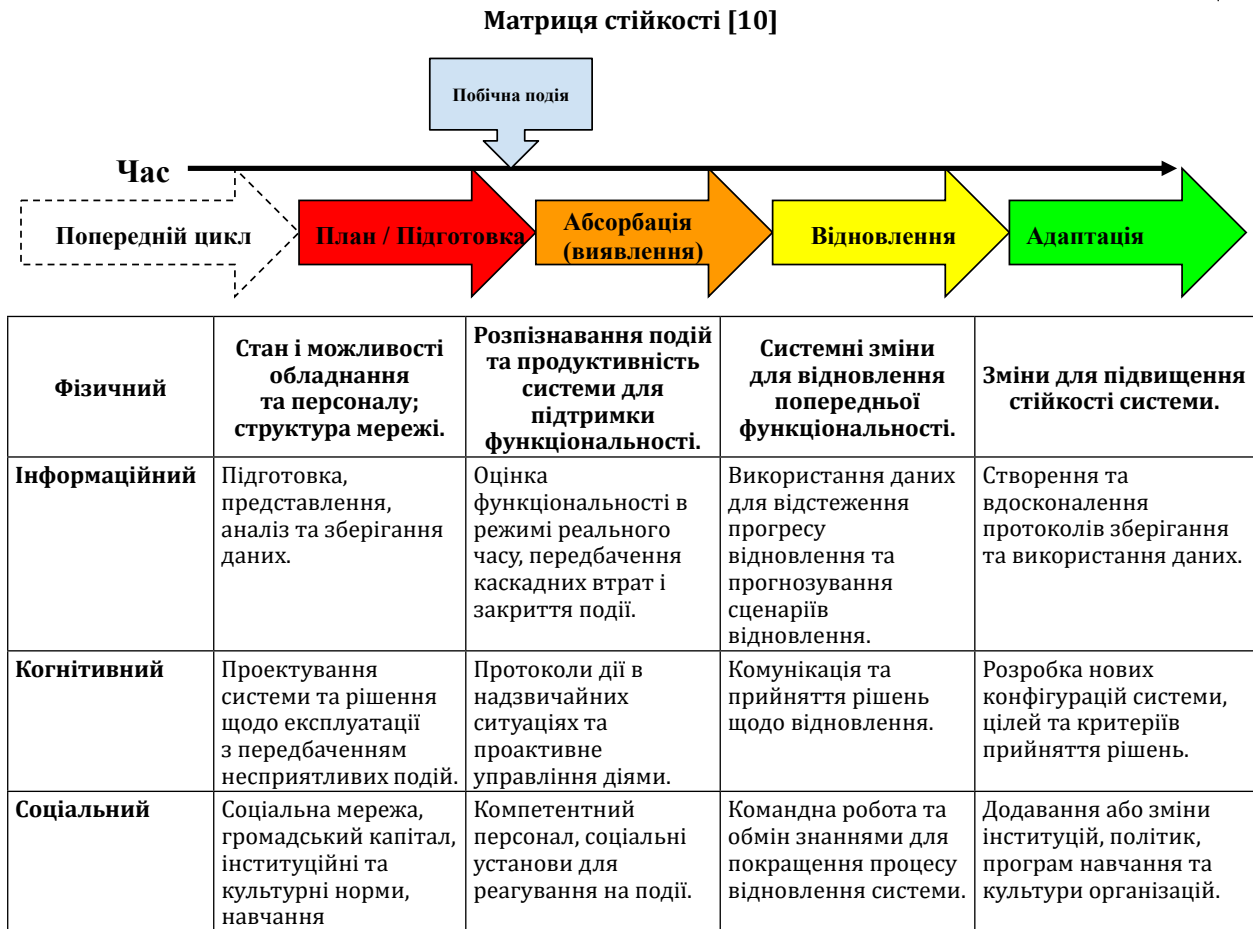
Доктрина NCW визначає чотири домени, які створюють спільний інформаційний ресурс у ситуації, коли необхідне прийняття рішень для підтримки виживання системи:

- Фізичний: фізичні ресурси, можливості та дизайн цих ресурсів.
- Інформаційний: інформація та розвиток інформації про фізичну область.
- Когнітивний: використання інформації доменів для прийняття рішень.
- Соціальний: організаційна структура та комунікація для прийняття когнітивних рішень.

В статті[10] співставили визначення чотирьох системних функцій NAS і чотирьох доменів NCW, щоб створити загальну матрицю показників стійкості. Ця матриця, яка у загальному вигляді відображає структуру відмовостійкості будь-яких систем показана в Таблиці 1.

У подальших дослідженнях група Лінкова значно розширила та специфікувала системні функції та домени цієї загальної матриці для застосування структур кібервідмовостійкості, зокрема і для метрик кібервідмовостійкості [10]. Важливо зазначити, що слова «метрика» та «міра» визначаються по-різному. Міра – це кількісний або якісний засіб запису атрибута конкретної системи або компонента системи. Метрика – це засіб для порівняння якості двох або більше систем або системних компонентів шляхом застосування міри. Наприклад, продуктивність системи під час кібервпливу буде метрикою, де швидкість передачі даних через неї буде мірою, пов'язаною з цією метрикою.

Таблиця 1



Методологія управління стійкістю CERT (CERT-RMM). Деякі інституції, вийшовши за рамки загальних стандартів кібербезпеки, впроваджених в ISO/IEC і NIST, розробили більш спеціалізовані стандарти щодо різних етапів і областей кібервідмовостійкості. Найбільш детальною з них є методологія управління стійкістю CERT (CERT-RMM), розроблена в Університеті Карнегі-Меллона [11]. CERT Resiliency Engineering Framework містить перелік стандартів і кодексів практики, які зазвичай використовуються для цієї мети. В рамках цієї методології інструмент самооцінки, який більше зосереджений на кібер-ризиках доступний на сайті організації, щоб допомогти організаціям оцінити свій рівень кібервідмовостійкості [12]. Оцінка кібервідмовостійкості ґрунтується на стрункій системі метрик:

- **Атрибут** – характеристика активу, сервісу або процесу стійкості.
- **Основна міра** – кількісно визначає атрибут.
- **Похідні міри** – математична функція двох або більше базових і/або похідних мір.
- **Показники** – критерії для прийняття рішення.
- **Інформаційна потреба** – комбінація показників для прийняття рішення.

Висновки. На основі аналізу наукових джерел було обґрунтовано різницю між кібербезпекою та кібервідмовостійкістю, деталізовано основні функції, цілі та мети кібервідмовостійкості. В наслідок цього інтерпретовано понятійний апарат кібервідмовостійкості в контексті кращих сучасних систем для оцінки кібервідмовостійкості, зокрема це: методологія групи Лінкова, методологія управління стійкістю CERT (CERT-RMM) та інженерна структура кібервідмовостійкості MITRE. Для них визначено основні метрики та домени. Розглянуто важливість та актуальність використання даного поняття для українських об'єктів ІТ-інфраструктури. Що стосується **перспектив подальшого дослідження**, то після остаточного формування поняття “кібервідмовостійкості” та визначення основних систем оцінки слід перейти до порівняння їх ефективності. Що в свою чергу дасть можливість адаптувати, застосувати існуючі концепції та створити власну модель кібервідмовостійкості для українських реалій. Паралельно треба розробляти фреймворки для оцінки кібервідмовостійкості реальних об'єктів. Такий досвід дозволить в подальшому створити національний стандарт кібервідмовостійкості. При цьому, можливо,

доведеться уточнити сам термін “кібервідмовостійкість”, більш наближений до цього поняття в зарубіжній науковій літературі.

Список використаних джерел:

1. Про затвердження Загальних вимог до кіберзахисту об'єктів критичної інфраструктури. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/518-2019-%D0%BF>.
2. Hausken, K. (2020). Cyber resilience in firms, organizations and societies. *Internet Things*, 11, 100204.
3. Park, J., T.P. Seager, P.S.C. Rao, M. Convertino, and I. Linkov. 2013. Integrating risk and resilience approaches to catastrophe management in engineering systems. *Risk Analysis* 33(3): 356–367.
4. Bodeau, D.J., Graubart, R.D., McQuaid, R., & Woodill, J. (2019). *Cyber Resiliency Metrics and Scoring in Practice-Use Case Methodology and Examples*.
5. Scottish Public Sector Action Plan On Cyber Resilience. *Cyber Resilience Framework: self-assessment tool user guide*. URL: https://www.gov.scot/binaries/content/documents/govscot/publications/adviceand_guidance/2019/10/cyber-resilience-framework/documents/cyber-resilience-framework.
6. Харламова, К., & Гальчинський, Л. (2022). ОЦІНЮВАННЯ КІБЕРСТІЙКОСТІ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ УКРАЇНИ. Collection of scientific papers «SCIENTIA», (November 11, 2022; Vilnius, Lithuania), 118-120.
7. Linkov, I.; Eisenberg, D.A.; Bates, M.E.; Chang, D.; Convertino, M.; Allen, J.H.; Flynn, S.E.; Seager, T.P. Measurable Resilience for Actionable Policy. *Environ. Sci. Technol.* 2013, 47, 10108–10110.
8. National Academy of Sciences (2012) *Disaster resilience: a national imperative*. Washington DC, United States. URL: http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=13457.
9. Alberts D (2002) *Information age transformation, getting to a 21st century military*. DOD Command and Control Research Program. URL: <http://www.dtic.mil/get-tr-doc/pdf?AD=ADA457904>.
10. Resilience metrics for cyber systems / I. Linkov, D. A. Eisenberg, K. Plourde, T.P. Seager, J. Allen, A. Kott 2013. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10669-013-9485-y>.
11. Caralli R, Allen J, White D, et al. *CERT Resilience Management Model, Version 1.2*. Pittsburgh: Carnegie Mellon University, 2016.
12. DHS. *Cyber Resilience Review (CRR): Self-Assessment Package*. Washington DC: Department of Homeland Security, 2016.

References:

1. Pro zatverdzhennia Zahalnykh vymoh do kiberzakhystu ob'ektiv krytychnoi infrastruktury [On the approval of General requirements for cyber protection of critical infrastructure objects. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/518-2019-%D0%BF>] [In Ukrainian].
2. Hausken, K. (2020). Cyber resilience in firms, organizations and societies. *Internet Things*, 11, 100204.
3. Park, J., T.P. Seager, P.S.C. Rao, M. Convertino, and I. Linkov. 2013. Integrating risk and resilience approaches to catastrophe management in engineering systems. *Risk Analysis* 33(3): 356–367.
4. Bodeau, D.J., Graubart, R.D., McQuaid, R., & Woodill, J. (2019). *Cyber Resiliency Metrics and Scoring in Practice-Use Case Methodology and Examples*.
5. Scottish Public Sector Action Plan On Cyber Resilience. *Cyber Resilience Framework: self-assessment tool user guide*. Retrieved from https://www.gov.scot/binaries/content/documents/govscot/publications/adviceand_guidance/2019/10/cyber-resilience-framework/documents/cyber-resilience-framework.
6. Kharlamova, K., & Galchynskyi, L. (2022). Otsiniuvannia kiberstiikosti ob'ektiv krytychnoi infrastruktury Ukrainy. [Assessment of cyber resistance of critical infrastructure facilities of Ukraine. Collection of scientific papers «SCIENTIA», (November 11, 2022; Vilnius, Lithuania), 118-120 [In Ukrainian].
7. Linkov, I.; Eisenberg, D.A.; Bates, M.E.; Chang, D.; Convertino, M.; Allen, J.H.; Flynn, S.E.; Seager, T.P. Measurable Resilience for Actionable Policy. *Environ. Sci. Technol.* 2013, 47, 10108–10110.
8. National Academy of Sciences (2012) *Disaster resilience: a national imperative*. Washington DC, United States. Retrieved from http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=13457.
9. Alberts D (2002) *Information age transformation, getting to a 21st century military*. DOD Command and Control Research Program. Retrieved from <http://www.dtic.mil/get-tr-doc/pdf?AD=ADA457904>.
10. Resilience metrics for cyber systems [Electronic resource] / I. Linkov, D. A. Eisenberg, K. Plourde, T.P. Seager, J. Allen, A. Kott – 2013. Retrieved from <https://link.springer.com/article/10.1007/s10669-013-9485-y>.
11. Caralli R, Allen J, White D, et al. *CERT Resilience Management Model, Version 1.2*. Pittsburgh: Carnegie Mellon University, 2016.
12. DHS. *Cyber Resilience Review (CRR): Self-Assessment Package*. Washington DC: Department of Homeland Security, 2016.

УДК 517:339.9

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.2.4>

Ольга КОВАЛЬЧУК

кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри прикладної математики Західноукраїнського національного університету, вул. Львівська, 11, Тернопіль, індекс 46004 (olhakov@gmail.com)

ORCID: 0000-0001-6490-9633

Olha KOVALCHUK

Candidate of Physics and Mathematics Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Applied Mathematics, West Ukrainian National University, 11 Lvivska Str., Ternopil, Ukraine, postal code 46004 (olhakov@gmail.com)

Бібліографічний опис статті: Ковальчук, О. Математична модель оцінювання макроекономічних наслідків припинення експорту російського газу у країни ЄС. *Інформаційні технології та суспільство*. 2023. Вип. 2(8). 34–41. DOI: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.2.4>

Bibliographic description of the article: Kovalchuk, O. (2023). Matematychna model otsiniuvannia makroekonomichnykh naslidkiv prypynennia eksportu rosiiskoho hazu u krainy YeS [A Mathematical Model for Assessing the Macroeconomic Consequences of the Cessation of Russian Gas Exports to EU Countries]. *Informatsiini tekhnolohii ta suspilstvo – Information technology and society*, 2(8), 34–41. DOI: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.2.4>

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОЦІНЮВАННЯ МАКРОЕКОНОМІЧНИХ НАСЛІДКІВ ПРИПИНЕННЯ ЕКСПОРТУ РОСІЙСЬКОГО ГАЗУ У КРАЇНИ ЄС

Через рік після вторгнення Росії в Україну світовий енергетичний ландшафт кардинально змінився. Регіони по всьому світу зіткнулися зі стрімким зростанням цін на скраплений природний газ (СПГ), що спричинило негативний ефект на глобальний ринок енергоресурсів на геополітичному тлі, в основі якого лежить глобальна енергетична безпека. У роботі представлено математичну модель визначення ефекту цінового шоку пропозиції СПГ на сукупний обсяг виробництва за припущення про повне довготермінове припинення постачання російського газу до країн Європейського Союзу (ЄС). Використано наближення другого порядку багатогалузевої моделі відкритої економіки з багатотакторними зв'язками між витратами та випуском. Запропонований підхід передбачає врахування мікроекономічних аспектів у моделі загальної рівноваги. У модель включено ендогенні змінні у частках витрат на газ та визначено відгуки цін і кількості споживання газу у відповідному масштабі ринку. До нелінійних характеристик застосовано апроксимацію виробничої функції другого порядку. Для оцінювання економічного впливу шоку від припинення постачання російського газу до ЄС застосовано апроксимацію в поєднанні з моделлю СПГ. Розраховано наближені прогностичні оцінки макроекономічних наслідків від раптового довготривалого припинення постачання російського СПГ у країни ЄС на однорічний період. Ефект шоку обчислено для мінімальної та зваженої еластичності. Встановлено, що світовий ринок СПГ згладжує наслідки припинення експорту російського газу для сукупного обсягу виробництва країн-імпортерів. Отримані оцінки не враховують постійних цін на СПГ, побічних ефектів на окремі галузі економіки, ризиків в окремих країнах та додатковий вплив попиту і не стосуються довгострокових наслідків. Це може спричинити невизначеність для кількісного оцінювання в лінійній моделі.

Ключові слова: енергетична безпека; скраплений природний газ; ціновий шок; експорт російського газу; глобального ринок СПГ; математична модель.

A MATHEMATICAL MODEL FOR ASSESSING THE MACROECONOMIC CONSEQUENCES OF THE CESSATION OF RUSSIAN GAS EXPORTS TO EU COUNTRIES

A year after Russia's invasion of Ukraine, the global energy landscape has changed dramatically. Regions around the world have faced a rapid rise in liquefied natural gas (LNG) prices, which has had a negative effect on the global energy market against a geopolitical backdrop based on global energy security. The paper presents a mathematical model for determining the effect of a price shock of LNG supply on the total production volume under the assumption of a complete long-term cessation of Russian gas supplies to the European Union (EU). A second-order approximation of a multi-sectoral open economy model with multifactor linkages between costs and output is used. The proposed approach involves taking into account microeconomic aspects in the general equilibrium model. The model includes endogenous variables in the shares of gas expenditures and identifies price and quantity responses of gas consumption at the relevant market scale. The second-order approximation of the production function is applied to nonlinear characteristics. To estimate the economic impact of the shock from the termination of Russian gas supplies to the EU, the approximation combined with the LNG model is used. Approximate forecast estimates of the macroeconomic consequences of a sudden long-term cessation of Russian LNG supplies to the EU countries for a one-year period are calculated. The shock effect is calculated for the minimum and weighted elasticities. It has been found that the global LNG market smooths out the consequences of the cessation of Russian gas exports for the aggregate production of importing

countries. The estimates do not take into account constant LNG prices, spillover effects on individual sectors of the economy, country-specific risks, and additional demand effects, and do not address long-term effects. This can lead to uncertainty for quantification in a linear model.

Key words: energy security; liquefied natural gas; price shock; export of Russian gas; global LNG market, mathematical model.

Вступ. Повномасштабна війна Росії в Україні ще більше загострила проблеми глобального зростання. Перспектива безпрецедентного повного припинення експорту СПГ з Росії посилює занепокоєння щодо дефіциту газу, ще вищих цін та економічних наслідків. Зміни, викликані політично вмотивованими обмеженнями Кремля, спричинили як тотальну паніку через стрімке зростання цін на енергоносії, так і очікування, що нинішній надлишок пропозиції може підштовхнути ціни до рекордно низького рівня. ЄС встановив дату відмови від російського газу до 2027 року. Цей процес можна прискорити, однак політикам не вистачає надійних оцінок для формування плану управління та мінімізації впливу повної довготермінової відмови ЄС від російського газу.

Метою роботи є отримання кількісних оцінок економічних наслідків припинення експорту російського газу для глобального ринку СПГ.

Наукова новизна. Вперше запропоновано математичну модель кількісного оцінювання ефекту шоку пропозиції та реакцію попиту та пропозиції глобального ринку СПГ на припинення експорту російського газу в ЄС.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В умовах загостренням геополітичної напруженості зросла кількість наукових досліджень з питань пошуку рішень для забезпечення незалежності енергетичної галузі країн світу від російського СПГ. Дж. Данн та К. Нілі встановили, що припинення постачання російського природного газу до Європи спричинить неоднорідні наслідки, які будуть залежати від особливостей погодних умов у країні та відповідної економічної політики [1]. І.-К. Мурарасу довів, що зростання залежності ЄС від імпорту російського газу спричинене, в основному, річним скороченням внутрішнього видобутку СПГ у країнах ЄС [2]. Т. Лан та ін. аналізували потенційний вплив на економіку Німеччини повного та постійного припинення поставок російського природного газу до Європи [3]. З. Ген виявив, що рівень ризику експорту російського природного газу в різні роки значно відрізняється [4]. Б. МакВільямс та ін. оцінювали наслідки повного припинення потоків природного газу з Росії до ЄС, враховуючи наявність, обмеження пропозиції та варіанти скорочення попиту [5]. Р. Велфенс визначив, що припинення постачання газу є політичною зброєю Росії в економічній війні із Заходом, внаслідок чого РФ втрачає політичну довіру та зменшує свої державні доходи [6]. П. Присецару проаналізував 10 заходів, спрямованих на заміну російських поставок газом з інших джерел [7]. У світлі наслідків війни Росії в Україні доцільними є нові підходи до розробки стратегії оптимізації глобальної енергетичної безпеки. Потрібні різнопланові дослідження щодо можливості скорочення імпорту газу ЄС з Росії.

Основна частина. Ринки природного газу в усьому світі доволі сегментовані через інфраструктуру транспортування. За даними British Petroleum [8] у 2021 році світове споживання природного газу становило приблизно 4037,5 мільярдів куб. м. Більше 3000 млрд куб. м – це трубопровідний газ, який переважно не інтегрований у глобальному масштабі. Імпорт російського природного газу по трубопроводах і СПГ становив майже 40% загального споживання природного газу в ЄС у 2021 році. Ціни на ці поставки встановлюються за різними формулами ціноутворення, включаючи поєднання цін на нафту та регіональний газ.

Споживання СПГ за межами ЄС становить близько 436 млрд куб. м. Основними економіками є Велика Британія, Китай, Індія, Японія, Пакистан, Південна Корея та китайська провінція Тайвань [8]. Як наслідок, ціни на СПГ у всьому світі різко зросли з 2021 року (Рис. 1). Підвищення цін на світовому ринку СПГ призвело до скорочення попиту як у ЄС [9], так і в інших країнах-імпортерах СПГ (Рис. 2).

Близько 70 відсотків світових продажів СПГ здійснюється за довгостроковими контрактами, які фіксують мінімальні обсяги газу. Однак формули ціноутворення часто пов'язані з основними контрольними показниками газу, такими як голландський TTF [11] або корейсько-японський маркер [12]. Більше того, значна частка довгострокових контрактів укладена з трейдерами, які перепродають СПГ клієнтам за стислі терміни на спотовому ринку. У разі створення арбітражних можливостей вантажі СПГ перенаправляються з Азії до Європи або навпаки.

Російський трубопровідний газ не може бути перенаправлений з Європи в інші частини світу. Російські газові родовища на півночі та заході РФ пов'язані лише з трубопроводами, що йдуть до Європи. Припинення надходження СПГ з російських трубопроводів до Європи зупинить видобуток супутнього газу в Росії, що стане справжнім шоком у постачанні на світовому ринку.

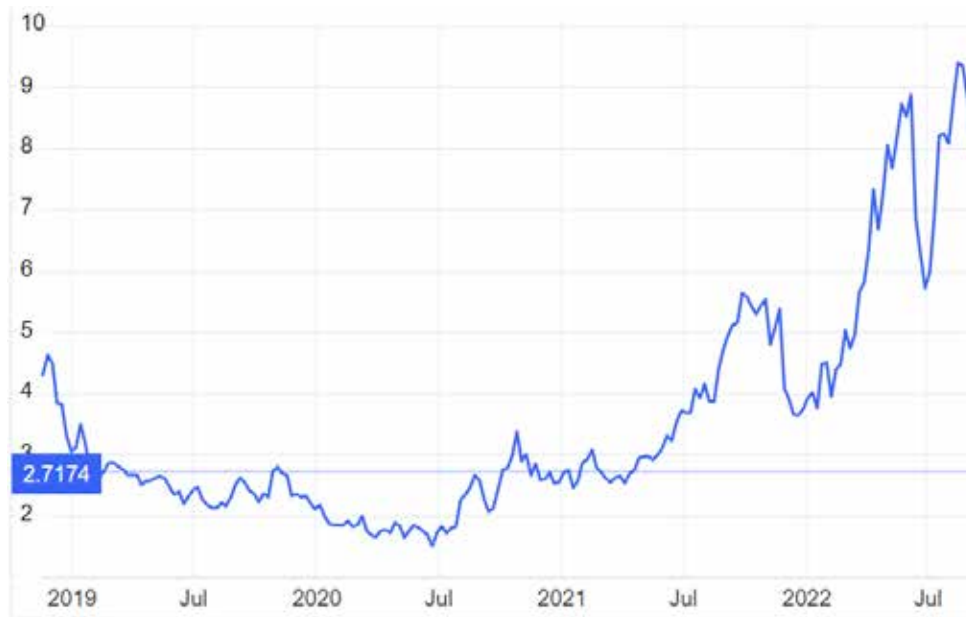


Рис. 1. Ціни на СПГ, у дол США за 1 куб. м [10]

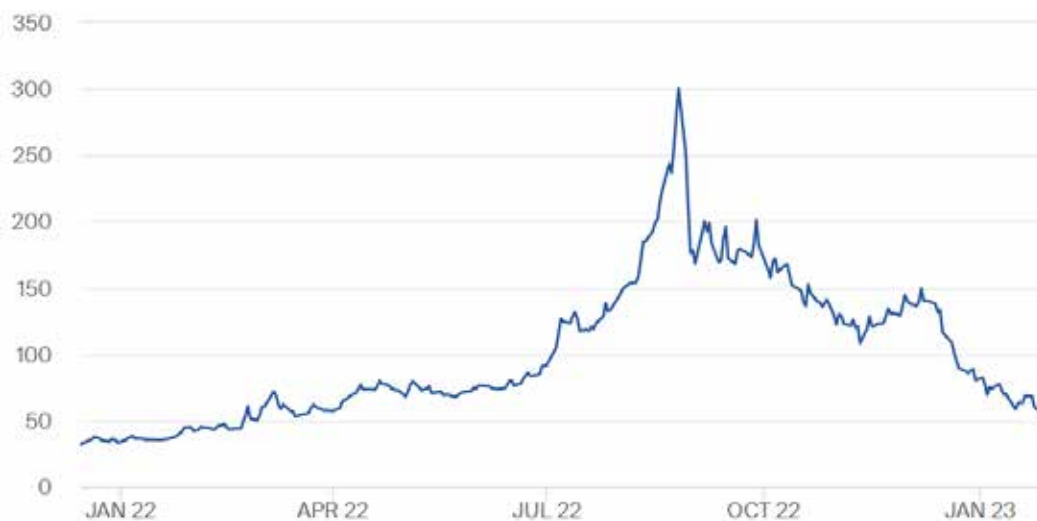


Рис. 2. Споживання СПГ, у млрд куб. м [11]

Методологія дослідження. Розглядається гіпотеза про повну раптову відмову країн ЄС від імпорту природного газу з Росії. У такому разі експорт російського газу у вигляді СПГ, який у 2021 оцінювався у більше, ніж 150 млрд куб. м [13], буде спрямований в іншу частину світу, що частково стане шоком для постачання природного газу [14]. Розмір шоку пропозиції оцінюється у 142 млрд. куб. м, що складає майже 17% від загального ринку СПГ в ЄС (Табл. 1).

Таблиця 1

Відносний розмір глобального шоку припинення постачання російського газу в ЄС

Російський експорт СПГ (2021), перенаправлений в інші країни	+13,2 млрд куб. м
Розмір шоку пропозиції	-141,8 млрд куб. м
Загальний розмір ринку	845 млрд куб. м
Розмір шоку пропозиції світового ринку СПГ	-16.8%

В основних країнах-імпортерах СПГ, на противагу ЄС [14], енергетична галузь є більш важливою, ніж житловий сектор (Рис. 3). Це призводить до нижчої середньої еластичності для цих країн, оскільки енергетична галузь має нижчу еластичність попиту, ніж житловий сектор.

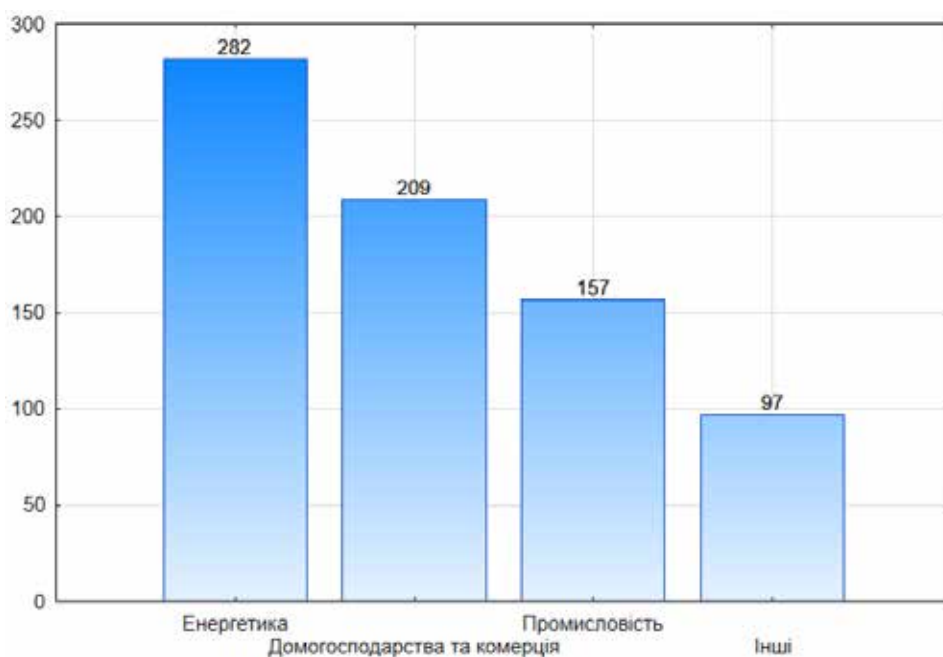


Рис. 3. Глобальне споживання природного газу за галузями, млрд. куб. м [15]

При розрахунках використано загальноприйняті галузеві оцінки еластичності (Табл. 2).

Таблиця 2

Еластичність цін на природний газ за галузями: [16, 17, 18, 19]

Галузь	Еластичність попиту за власною ціною	Частка глобального споживання природного газу (%)
Промисловість	0,084	42
Домогосподарства	0,24	69
Енергетика	0,136	77
Інші галузі	0,22	11

Світовий видобуток газу достатньо нееластичний у короткостроковій перспективі. Регіон із найвищою еластичністю природного газу в найближчій перспективі – це США завдяки видобутку сланцевого газу. Однак ринок газу США не повністю інтегрований з ринками Європи та Азії.

У попередній роботі ми визначили рівноважну ціну на СПГ [14]:

$$\bar{P} = -\frac{\varepsilon^v - \varepsilon^s + \lambda(\bar{s} - s)}{E^v + E^s}, \quad (1)$$

де E^v – цінова еластичність попиту, E^s – цінова еластичність пропозиції, $\bar{s}$ – середнє значення обсягів зберігання СПГ, s – поточні обсяги зберігання СПГ, ε^v та ε^s – похибки.

За умов відсутності шоків попиту ε^v та сталих обсягів зберігання рівноважна ціна визначається за формулою:

$$\bar{P} = -\frac{\varepsilon^s}{E^v + E^s}. \quad (2)$$

Макроекономічна модель оцінювання впливу шоку пропозиції СПГ на сукупний обсяг виробництва за гіпотези про припинення постачання російського газу до країн ЄС

У дослідженнях використано наближення другого порядку багатогалузевої моделі відкритої економіки з багатофакторними зв'язками між витратами та випуском [20]. Потрясіння у постачанні енергії можуть призвести до значних макроекономічних нелінійностей [21]. За теоремою Халтена вплив мікроекономічного шоку загальної продуктивності факторів виробництва на сукупну багатогалузеву продуктивність дорівнює продажам виробника в умовах шоку як частці ВВП [22]. Це наближення першого порядку базується на ефективній економіці за припущення виробничої функції Кобба-Дугласа. Однак енергетичний сектор має нижчу еластичність заміщення, ніж інші галузі економіки. Тому шок продажів СПГ може завдати значно більшої шкоди економіці, ніж, наприклад, такого ж обсягу шок продажів у роздрібній торгівлі. Окрім того, виробнича функція Кобба-Дугласа не враховує й інші мікроекономічні деталі, які можуть бути важливими для природного газу. Зокрема, мережеві зв'язки, мікроекономічну віддачу від можливого перерозподілу факторів всередині галузей, між галузями та між країнами. Врахування цих мікроекономічних аспектів в модель загальної рівноваги та економічної ефективності спричиняє у відповідь на шоки ендегенні зміни матриці витрати-випуску, а результатні нелінійності формуються мікроекономічними особливостями виробничої структури [21]. До нелінійних характеристик ми використали апроксимацію виробничої функції другого порядку.

Зроблено припущення про наявність внутрішніх факторів виробництва h (наприклад, різні види праці), імпортих товарів m , товарів вітчизняного виробництва k . Кожен виробник товару k знаходиться в межах умовної країни n . Товар k може споживатися всередині країни чи за кордоном як кінцевий продукт або використовуватися як проміжний ресурс. Виробнича функція для k – це стала віддача від масштабу праці l та проміжних витрат x :

$$y_k = A_k f\left(\{l_{h,k}\}_{h \in H}, \{x_{h,k}\}_{j \in J}\right), \quad (3)$$

де A – нейтральна продуктивність (не впливає на баланс праці та капіталу у виробничій функції) для галузі k .

У кожній країні n є умовне домогосподарство з гіпотетичними вподобаннями щодо всіх товарів k :

$$C_n = C\left(\{y_{n,k}\}_{k \in K}\right), \quad (4)$$

де $y_{n,k}$ – споживання товару k у країні n .

Оскільки в моделі немає накопичення капіталу, споживання дорівнює валовому національному продукту (ВНП). Враховуючи наявність проміжних ресурсів, валовий випуск у кожній економіці перевищує валовий внутрішній продукт (ВВП). В умовах рівноваги маємо:

$$y_n = \sum_n C_n + \sum_j Cx_{kj} \quad (5)$$

для всіх k .

В окремій країні зміна валового національного продукту з точністю до другого порядку наближення може бути записана у наступному вигляді [20, 21]:

$$\Delta \ln Y = \sum_j \frac{p_j x_j^m}{Y} \Delta \ln x_j^m - \sum_j \frac{p_k x_k^x}{Y} \Delta \ln x_k^x + \frac{1}{2} \left[\sum_j \Delta \frac{p_j x_j^m}{Y} \Delta \ln x_j^m - \sum_j \Delta \frac{p_k x_k^x}{Y} \Delta \ln x_k^x \right], \quad (6)$$

де p – набір цін, Y – реальні ВНП до удару шоку, m – експортовані ресурси, x – імпортовані ресурси. Якщо припустити, що шок стосується лише галузі, яка споживає природний газ, вплив на експорт дорівнює нулю. Тоді рівняння можна спростити до наступного вигляду:

$$\Delta \ln Y = \frac{p_{газ} x_{газ}^m}{Y} \Delta \ln x_{газ}^m + \frac{1}{2} \Delta \frac{p_{газ} x_{газ}^m}{Y} \Delta \ln x_{газ}^m. \quad (6)$$

Перша частина рівняння базується на наближенні першого порядку теореми Халтена [22], друга є наближенням другого порядку для нелінійності з врахуванням структури виробництва на мікрорівні.

У наближенні другого порядку взаємозв'язки входу-виходу зберігаються і визначатимуть реакції ендегенних змінних $p_{газ}$ та $x_{газ}^m$. В офіційних джерелах відсутні деагреговані глобальні дані про витрати

ти-випуск, які б дали можливість визначити ендогенні відгуки цін і кількості споживання газу за допомогою повної моделі. Тому для оцінювання економічного впливу шоку від припинення постачання російського газу до ЄС застосовано апроксимацію в поєднанні з моделлю СПГ [13].

За формулою (6) можна обчислити вплив шоку пропозиції, що виникає внаслідок припинення експорту російського природного газу до ЄС, на сукупний обсяг виробництва. Ефект шоку цін обчислено за даними на СПГ ТТФ за I квартал 2022 року для мінімальної та зваженої еластичності (Табл. 3) за формулою (2) [14].

Таблиця 3

Вплив припинення постачання російського газу до ЄС на ціну СПГ на глобальному ринку

	Еластичність	Логарифм цін, у %	Рівень цін	Зростання ціни, у %	Ціна (дол./м³)
1	Зважена	0,75	2,1	110,9	68,0
2	Мінімальна	1,17	3,2	220,7	103,3

У таблиці 4 представлено частки світових витрат на імпорт СПГ у ВВП.

Таблиця 4

Макроекономічні наслідки відмови від російського природного газу для ЄС

	Еластичність	Скориговане споживання країнами ЄС, млрд. куб.	Частка витрат на імпорт (2021), у %	Частка витрат на імпорт (після потрясіння), у %	Зміна частки витрат
1	Зважена	312,9	1,4	4,7	3,3
2	Мінімальна	322,2	1,4	7,3	5,9

Якщо додати частки витрат на імпорт природного газу до рівняння (6), отримаємо зміну виробництва. Прогнозні величини макроекономічних наслідків від раптового постійного припинення постачання російського газу у країни ЄС на однорічний період наведено у Табл. 5. Це наближені оцінки, що не враховують ризики в окремих країнах та додатковий вплив попиту.

Таблиця 5

Макроекономічні наслідки припинення постачання російського природного газу

	Еластичність	Оцінки, у %	Шок пропозиції як частка споживання, у %	Цінова еластичність попиту	Скоригований чистий імпорт (млрд. м³)	Зростання ціни, %
1	Зважена	-0,42	-16,8	0,170	313	111
2	Мінімальна	-0,50	-16,8	0,084	322	221

Світовий ринок СПГ забезпечує буфер для наслідків припинення експорту російського газу на сукупний обсяг виробництва країн-імпортерів СПГ, що не є членами ЄС. Результати для Великобританії та інших імпортерів СПГ показують суттєвий сукупний ефект виробництва в діапазоні від -0,05 відсотка для Китаю до -0,42 відсотка для Південної Кореї (Табл. 6). Відмінності між країнами відображають різні частки витрат на газ в економіці та галузевий склад споживання газу країнами.

Отримані оцінки не стосуються довгострокових наслідків, які потенційно можуть виникнути внаслідок погіршення стану державних фінансів. Водночас глобальні витрати на газ зростуть на 2,5 % (Табл. 5). Ціни на газ зростуть більш ніж на 1000 відсотків, а частка витрат на імпорт газу зросте до понад 20 відсотків ВВП. Вплив на ВВП становитиме 2,7 відсотка за мінімальної еластичності. Загальні витрати на СПГ складуть майже 20 відсотків ВВП. Значне зростання цін і частки імпорту не призводить до більшого негативного впливу на ВВП. Це пояснюється тим, що запропонована модель не враховує постійні ціни. Вищі ціни на газ і частки витрат на імпорт компенсуються нижчими відносними цінами на інші товари та послуги, включаючи реальну заробітну плату [21]. Окрім того, можуть спостерігатись побічні ефекти на окремі галузі економіки.

Таблиця 6

**Макроекономічні наслідки відключення російського природного газу
для економік країн-імпортерів СПГ**

	Еластичність	Зважена	Мінімальна
1	China	-0,05	-0,07
2	India	-0,13	-0,16
3	Japan	-0,27	-0,36
4	Korea	-0,42	-0,53
5	Pakistan	-0,40	-0,47
6	Taiwan Province of China	-0,38	-0,55
7	Mexico	-0,06	-0,08
8	Argentina	-0,04	-0,05
9	Chile	-0,14	-0,18
10	Turkey	-0,26	-0,33
11	Kuwait	-0,38	-0,66
12	Singapore	-0,18	-0,27
13	Thailand	-0,14	-0,22
14	United Kingdom	-0,33	-0,45
15	ЄС	-1,38	-2,65

Висновки. Запропоновано математичну модель оцінювання впливу цінового шоку на світовий ринок СПГ за гіпотези про припинення постачання російського газу до країн ЄС. Використано наближення другого порядку багатогалузевої моделі відкритої економіки з багатofакторними зв'язками між витратами та випуском. Застосовано апроксимацію в поєднанні з моделлю СПГ. Обчислено вплив шоку пропозиції для мінімальної та зваженої еластичності на сукупний обсяг виробництва. Розраховано наближені прогнозні величини макроекономічних наслідків від раптового постійного припинення постачання російського газу у країни ЄС на однорічний період. Отримані оцінки не враховують постійних цін на СПГ, побічних ефектів на окремі галузі економіки, ризиків в окремих країнах та додатковий вплив попиту і не стосуються довгострокових наслідків. Окрім того сезонний попит може призвести до вузьких місць інфраструктури, які є дуже невизначеними для кількісної оцінки в лінійній моделі. Це є предметом для майбутніх досліджень.

Список використаних джерел:

- Dunn, J., & Neely, C. J. (2022). A Shutoff of Russian Natural Gas. *Economic Synopses*. Federal Reserve Bank of St. Louis, 29, 1-2.
- Murarasu, I.-C. (2023). Analysis of the European Union's Energy Dependence on the Russian Federation. The European Resilience in Gas Supply in the Context of Russian-Ukrainian Tensions. *Digital Economy and the Green Revolution*. Mihail Busu (ed.), 175-187.
- Lan, T., Sher, G. & Zho, J. (2022). The Economic Impacts on Germany of a Potential Russian Gas Shutoff. *IMF Working Papers*, 2022/144. International Monetary Fund.
- Geng, Z. (2021). Russian Energy Strategies in the Natural Gas Market for Energy Security. *International Journal of Energy Economics and Policy, Econjournals*, 11,2, 62-66.
- McWilliams, B., Sgaravatti, G., Tagliapietra, S., Zachmann, G. (2023). Can Europe live without Russian natural gas? *The World Economy*, 46,4, 897-905.
- Welfens, P. J. J. (2022). A Russian Gas Supply Boycott Against Western Countries. *Russia's Invasion of Ukraine*, 0, 99-113.
- Prisecaru, P. (2022). A 10-Point Plan of Iea to Reduce the European Union'S Reliance on Russian Natural Gas. *Euroinfo*, Institute for World Economy, Romanian Academy, 6,1, 16-26.
- BP (2022). Statistical review of world energy. *British Petroleum*, London.
- Kovalchuk, O., Shynkaryk, M., Berezka, K, Babala, L., Chopyk, P., Basistyi, P. (2022). Data Mining Tools for Analysis of Dependence of Gas Consumption of the Gas Price for Housholds of the EU Memberd-States. *12th International Conference "Advanced Computer Information Technologies"* (pp. 267-271). Spišská Kapitula, Slovakia.
- Natural gas. Trading Economics (2023). <https://tradingeconomics.com/commodity/natural-gas>
- Dutch TTF Natural Gas Futures. ICE Endex, 2-23. <https://www.theice.com/products/27996665/Dutch-TTF-Gas-Futures/data?marketId=5586285&span=3>
- Platts JKM™ (Japan Korea Marker) LNG Price Assessment. *S&P Global Commodity Insights*. <https://www.spglobal.com>
- Albrizio, S., Bluedorn J., Koch, C., Pescatori, A., Stuermer, M. (2022). Market Size and Supply Disruptions: Sharing the Pain of a Potential Russian Gas Shut-off to the European Union. *IMF Working Paper*, No. WP/22/143.

14. Kovalchuk, O., Babii, S., Kasianchuk, M. (2022). Model ocynyuvannya efektyv cinovogo shoku rynku prirodnogo gazu v YeS v umovah vidmovi vid rosijskogo importu [Assessing Model for Effects of Price Shock on the Natural Gas Market]. *Information technology and society*, 4,6, 23-27. [in Ukrainian].
15. Share of natural gas final consumption by sector. (2019). IEA. Retrieved from <https://www.iea.org>.
16. Andersen, T., Nilsen, O. & Tveteras, R. (2011). How is demand for natural gas determined across European industrial sectors? *Energy Policy*, 39,9, 5499-5508.
17. Asche, F., Nilsen, O. & Tveteras, R. (2008). Natural gas demand in the European household sector. *The Energy Journal*, 29,3.
18. Serletis, A., Timilsina, G. R., & Vasetsky, O. (2010). Interfuel substitution in the United States. *Energy Economics*, 32,3, 737-745.
19. Labandeira, X., Labeaga, J. M., & Lopez-Otero, X. (2017). A meta-analysis on the price elasticity of energy demand. *Energy Policy*, 102, 549-568.
20. Bachmann, R., Baqaee, D., et al. (2022). What if? The economic effects for Germany of a stop of energy imports from Russia. ECONtribute Policy Brief, 28.
21. Baqaee, D., & Farhi E. (2019). Networks, Barriers, and Trade. Working Paper 26108. National Bureau of Economic Research.
22. Hulten, C. R. (1978). Growth accounting with intermediate inputs. *The Review of Economic Studies* 45,3, pp. 511-518.

УДК 004.09

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.2.5>

Олена ЛЯШЕНКО

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри програмних засобів і технологій, Херсонський національний технічний університет, вул. Інститутська, 11, м. Хмельницький, Україна, 29016 (olenakntu@gmail.com)

ORCID: 0000-0002-5429-8389

Станіслав ПОСЛАВСЬКИЙ

студент кафедри програмних засобів і технологій, Херсонський національний технічний університет, вул. Інститутська, 11, м. Хмельницький, Україна, 29016 (poslavskiy@gmail.com)

ORCID: 0000-0002-5823-7334

Дмитро КИРИЙЧУК

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри програмних засобів і технологій, Херсонський національний технічний університет, вул. Інститутська, 11, м. Хмельницький, Україна, 29016 (kidiar2@gmail.com)

ORCID: 0000-0002-4905-6932

Віктор ПРАЧИК

аспірант кафедри програмних засобів і технологій, Херсонський національний технічний університет, вул. Інститутська, 11, м. Хмельницький, Україна, 29016 (victorprachyk@gmail.com)

ORCID: 0000-0002-4820-6830

Світлана БУНККУС

аспірантка кафедри програмних засобів і технологій, Херсонський національний технічний університет, вул. Інститутська, 11, м. Хмельницький, Україна, 29016 (bunkussveta@gmail.com)

ORCID: 0000-0002-38232-7724

Olena LIASHENKO

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Software Tools and Technologies, Kherson National Technical University, str. Instytutska, 11, Khmelnytskyi, Ukraine, 29016 (olenakntu@gmail.com)

Stanislav POSLAVSKYI

Student at the Department of Software Tools and Technologies, Kherson National Technical University, str. Instytutska, 11, Khmelnytskyi, Ukraine, 29016 (poslavskiy@gmail.com)

Dmytro KYRYICHUK

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Software Tools and Technologies, Kherson National Technical University, str. Instytutska, 11, Khmelnytskyi, Ukraine, 29016 (kidiar2@gmail.com)

Viktor PRACHYK

PhD student at the Department of Software Tools and Technologies, Kherson National Technical University, str. Instytutska, 11, Khmelnytskyi, Ukraine, 29016 (victorprachyk@gmail.com)

Svitlana BUNKKUS

PhD student at the Department of Software Tools and Technologies, Kherson National Technical University, str. Instytutska, 11, Khmelnytskyi, Ukraine, 29016 (bunkussveta@gmail.com)

Бібліографічний опис статті: Ляшенко, О., Пославський, С., Кирийчук, Д., Прачик, В., Бунккус, С. Розроблення мобільного додатку для відстеження стану здоров'я та планування харчування маломобільних груп населення в умовах надзвичайних ситуацій. *Інформаційні технології та суспільство*. 2023. Вип. 2(8). 42–50. DOI: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.2.5>

Bibliographic description of the article: Liashenko, O., Poslavskiy, S., Kyryichuk, D., Prachyk, V., Bunkkus, S. (2023). Rozroblennia mobilnoho dodatku dlia vidstezhennia stanu zdorovia ta planuvannia kharchuvannia malomobilnykh hrup naselennia v umovakh nadzvychainykh sytuatsii [Development of a mobile application

for health tracking and meal planning for people with limited mobility in emergency situations]. *Informatsiini tekhnologii ta suspilstvo – Information technology and society*, 2(8), 42–50. DOI: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.2.5>

РОЗРОБЛЕННЯ МОБІЛЬНОГО ДОДАТКУ ДЛЯ ВІДСТЕЖЕННЯ СТАНУ ЗДОРОВ'Я ТА ПЛАНУВАННЯ ХАРЧУВАННЯ МАЛОМОБІЛЬНИХ ГРУП НАСЕЛЕННЯ В УМОВАХ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ

Метою роботи є розроблення мобільного додатку для відстеження стану здоров'я та планування харчування маломобільних груп населення в умовах надзвичайних ситуацій. **Методологія.** При розробці мобільного додатку було використано методологію Dual-track Agile та методологію об'єктно-орієнтованого програмування. **Результати.** Проведено аналіз основних тенденцій розвитку програмного забезпечення для відстеження стану здоров'я та планування харчування маломобільних груп населення в умовах надзвичайних ситуацій. Визначено основні функціональні можливості та принципи роботи таких систем. Виявлено сучасні тенденції побудови, розвитку та застосування таких систем. **Наукова новизна.** Вирішено актуальне науково-практичне завдання, що полягає в теоретико-методологічному обґрунтуванні підходів та принципів побудови програмних систем для відстеження стану здоров'я та планування харчування маломобільних груп населення в умовах надзвичайних ситуацій. **Практична значимість.** Полягає в можливості застосування теоретико-методологічних підходів і висновків, отриманих в межах роботи для розробки та впровадження програмного забезпечення для відстеження стану здоров'я та планування харчування маломобільних груп населення в умовах надзвичайних ситуацій.

Висновок. В роботі описано основні вимоги до програмного продукту, описано бізнес-логіку використання мобільного додатку, наведено методи обробки запитів доступу (Permissions), наведено опис функціональних можливостей мобільного додатку, наведено проектування бази даних, розроблено діаграму класів БД, описано процес проектування архітектури мобільного додатку, побудовано діаграму архітектури мобільного додатку.

Ключові слова: мобільний додаток, методологія Dual-track Agile, методологія об'єктно-орієнтованого програмування, відстеження стану здоров'я, маломобільні групи населення.

DEVELOPMENT OF A MOBILE APPLICATION FOR HEALTH TRACKING AND MEAL PLANNING FOR PEOPLE WITH LIMITED MOBILITY IN EMERGENCY SITUATIONS

The purpose of the work is to develop a mobile application for tracking the health status and planning nutrition of people with limited mobility in emergency situations. **Methodology.** When developing a mobile application, the Dual-track Agile methodology and the object-oriented programming methodology were used. **Results.** An analysis of the main trends in the development of software for tracking the health status and planning nutrition of people with limited mobility in emergency situations was carried out. The basic functionality and principles of operation of such systems are defined. Current trends in the construction, development and application of such systems have been identified. **Scientific novelty.** An actual scientific and practical task has been solved, consisting in the theoretical and methodological justification of approaches and principles for building software systems for tracking the health status and planning nutrition of people with limited mobility in emergency situations. **Practical significance.** It consists in the possibility of applying theoretical and methodological approaches and conclusions obtained within the framework of work to develop and implement software for tracking the health status and planning the nutrition of people with limited mobility in emergency situations.

Conclusion. The paper describes the basic requirements for the software, describes the business logic of using a mobile application, provides methods for processing access requests (Permissions), describes the functionality of the mobile application, provides database design, developed a database class diagram, describes the process of designing the mobile application architecture, built a diagram of the mobile application architecture.

Key words: Mobile application, Dual-track Agile methodology, Object-Oriented Programming Methodology, Health Tracking, People with Limited Mobility.

Постановка проблеми. За визначенням Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ) здоров'я людини може бути визначене як оптимальний стан організму, що забезпечує реалізацію генетичних програм безумовно-рефлекторної, інстинктивної, генеративної функції і розумової діяльності, що реалізує фенотипові поведінки, спрямоване на соціальну і культурну сфери [1]. Найважливішими біологічними показниками здоров'я людини є [1]: частота серцевих скорочень; артеріальний тиск; частота дихальних рухів; температура тіла.

До найбільш важливих засобів забезпечення здоров'я відносять правильне раціональне харчування. Їжа є одним з найважливіших факторів навколишнього середовища, що впливає на стан здоров'я, працездатності, розумового і фізичного розвитку, а також на тривалість життя особливо маломобільних груп населення в умовах надзвичайних ситуацій. Порушення в харчуванні, що спостерігаються в різних вікових маломобільних групах населення, зазвичай однакові. Це, в першу чергу, надлишок в їжі вуглеводів та жирів тваринного походження і дефіцит овочів, фруктів і ягід, а також порушення режиму харчування. Кожне з цих порушень, навіть окремо взяте, може впливати на стан здоров'я людини.

Таким чином, проектування та розроблення програмного забезпечення для відстеження стану здоров'я та планування харчування маломобільних груп населення в умовах надзвичайних ситуацій є актуальною науково-прикладною задачею. Побудова програмного забезпечення для відстеження

стану здоров'я та планування харчування маломобільних груп населення в умовах надзвичайних ситуацій потребує виявлення та аналізу сучасних тенденцій розвитку та застосування таких систем, насамперед, на основі провідних наукових публікацій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В роботі [1] наведено результати розробки нової медичної інформаційної системи на основі баз даних для моніторингу ряду показників стану здоров'я населення. Система є мережевою, Інтернет-базованою, містить ряд взаємопов'язаних електронних баз упорядкованих даних із відповідним виводом цієї інформації на монітори, в тому числі даних біохімічної лабораторії щодо наявності речовин-забруднювачів доквілля в організмі. Передбачена можливість попереднього автоматизованого аналізу даних, а також захист персональних даних пацієнтів та інших обстежених осіб за допомогою оригінальної розробки електронного апаратного ключа. Наведено інформацію про структуру розробленої системи, її функції та функції деяких її найважливіших блоків, зразки розробленого авторами програмного забезпечення та засобів захисту інформації.

В роботі [2] наведено результати розробки та застосування мобільної технології у системі відстеження стану здоров'я. За допомогою мобільної технології можна контролювати фізіологічні дані пацієнтів, де б вони не були (вдома, на роботі, у дорозі тощо). Завдяки цьому дані ЕКГ пацієнтів можуть дистанційно контролювати не лише самі пацієнти, а й їхні супутники та лікарі. Розроблено програму в Android Studio, вона отримує дані з Arduino Card за допомогою екрану датчика електронного здоров'я через технологію Bluetooth.

В роботі [3] описано прототип мобільного додатку для охорони здоров'я. Додаток пропонує зручні телемедичні послуги, які дозволяють лікарям-спеціалістам діагностувати пацієнтів онлайн. Додаток також полегшує замовлення ліків за допомогою онлайн-оплати. Ліки можуть бути доставлені безпосередньо в потрібне місце, а в екстрених випадках пацієнт може викликати службу швидкої допомоги. Система дозволяє лікарям і медсестрам постійно контролювати стан здоров'я своїх пацієнтів. Аптеки також можуть використовувати додаток, щоб пропонувати та доставляти свої медичні продукти пацієнтам.

В роботі [4] описано приклади використання пристроїв для самовідстеження показників здоров'я у повсякденному житті. Запропоновано інформаційну технологію для відстеження показників здоров'я.

Постановка завдання. Нині практично відсутній огляд сучасних теоретико-методологічних підходів до розроблення програмних систем для відстеження стану здоров'я та планування харчування маломобільних груп населення в умовах надзвичайних ситуацій, а також шляхів подальшого розвитку таких систем.

Таким чином, метою статті є проектування та розроблення мобільного додатку для відстеження стану здоров'я та планування харчування маломобільних груп населення в умовах надзвичайних ситуацій із застосуванням сучасних теоретико-методологічних підходів в цій галузі.

Виклад основного матеріалу.

Застосування методології Dual-track Agile для розробки мобільного додатку.

Для розроблення мобільного додатку було використано методологію Dual-Track Agile. Dual-Track Agile – це гнучка методологія, яка містить два окремих треки. Трек «Discovery» та трек «Product Delivery». Трек Discovery зосереджено на створенні, тестуванні та перевірці ідей продукту. Трек Product Delivery працює над перетворенням цих ідей у реальний продукт. Dual-Track Agile забезпечує спосіб поєднання цілей гнучкої розробки та дизайну UX. Обидва треки працюють узгоджено та ведуть до реалізації продукту. Двостороння гнучкість дозволяє командам паралельно працювати над дослідженнями та розробкою продукту [5,6].

Таким чином, робота на мобільним додатком поділяється на два треки. Перший, Product Delivery, це звичайний Agile. Але в паралель із ним йде трек Discovery. Їм зайнята невелика частина основної команди, яка перевіряє гіпотези і шукає новизну. Це може бути інтерв'ювання, і запуск тривіальних Real-Data гіпотез, невеликі MVP. Ідеї валідуються Product Discovery Team, які вони швидко тестують і потім віддають на Delivery [5,6].

До Product Discovery Team входять: Product Manager, UX designer, Subject matter expert (Lead Engineer).

Бізнес-логіка використання мобільного додатку.

Бізнес-логіка програми – це опис схем, за якими програма взаємодіє з користувачем. Бізнес-логіка використання мобільного додатку припускає наступні ролі: Користувач мобільного додатку, Адміністратор БД.

Логіка Користувача:

1. Користувачем мобільного додатку може стати будь-яка людина, яка завантажила та встановив додаток з магазину Google Play. Для використання мобільного додатку потрібна реєстрація.

2. Користувач встановлює програму з Google Play.

3. Користувач запускає програму та створює обліковий запис.

4. Після заповнення реєстраційних даних та до створення облікового запису користувачеві пропонується прийняти Угоду про використання, в тому числі, що вказує на вікові обмеження. У разі неприйняття Угоди, процес реєстрації починається з початку.

5. Обліковий запис активується одразу після створення. Підтвердження щодо електронної пошти не потрібно. На електронну пошту надсилається вітальний лист про реєстрацію.

6. Після створення облікового запису користувач авторизується у додатку та може користуватися додатком.

Логіка Адміністратора БД.

Основна роль адміністрування бази даних полягає у забезпеченні максимального часу роботи бази даних, щоб вона завжди була доступна за потреби. Ці дії включають в себе періодичний моніторинг і усунення несправностей.

Адміністратор БД також відповідає за такі критично важливі завдання та ролі:

1. Безпека бази даних. Забезпечення доступу до бази даних лише авторизованим користувачам та захист від будь-якого зовнішнього несанкціонованого доступу.

2. Налаштування бази даних. Налаштування будь-якого з кількох параметрів для оптимізації продуктивності, таких як розподіл пам'яті сервера, фрагментація файлів та використання диска.

3. Резервне копіювання та відновлення. Роль адміністратора БД полягає в тому, щоб забезпечити наявність у базі даних адекватних процедур резервного копіювання та відновлення для відновлення після будь-якої випадкової чи навмисної втрати даних.

4. Створення звітів із запитів. Створення звітів шляхом написання запитів, які потім запускаються для бази даних.

До основних функціональних можливостей мобільного додатку можна віднести такі: щоденник харчування; лічильник калорій; трекер макронутрієнтів (білків, жирів та вуглеводів) та рейтинг продуктів; трекер споживання води; дієти та плани харчування для зниження ваги та зміни складу тіла; схеми інтервального голодування; плани харчування зі списком покупок; підключення фітнес-трекерів та відстеження стану здоров'я.

У мобільному додатку доступні такі дієти та плани харчування для зниження ваги:

1) кетодієта/низьковуглеводна дієта, що націлена на зниження частки вуглеводів у раціоні. Є три рівні: простий, звичайний та строгий;

2) середземноморська дієта, що допоможе їсти більше овочів та фруктів;

3) високопротеїнова дієта, що допоможе наростити м'язову масу;

4) дієта «Чисте харчування», що спрямована на споживання корисних продуктів;

5) скандинавська дієта, що допоможе збільшити частку клітковини та корисних жирів у раціоні;

6) екодієта, що допоможе не тільки харчуватися правильно, а й піклуватися про довкілля.

Діаграми варіантів використання мобільного додатку подано на рис. 1-2.

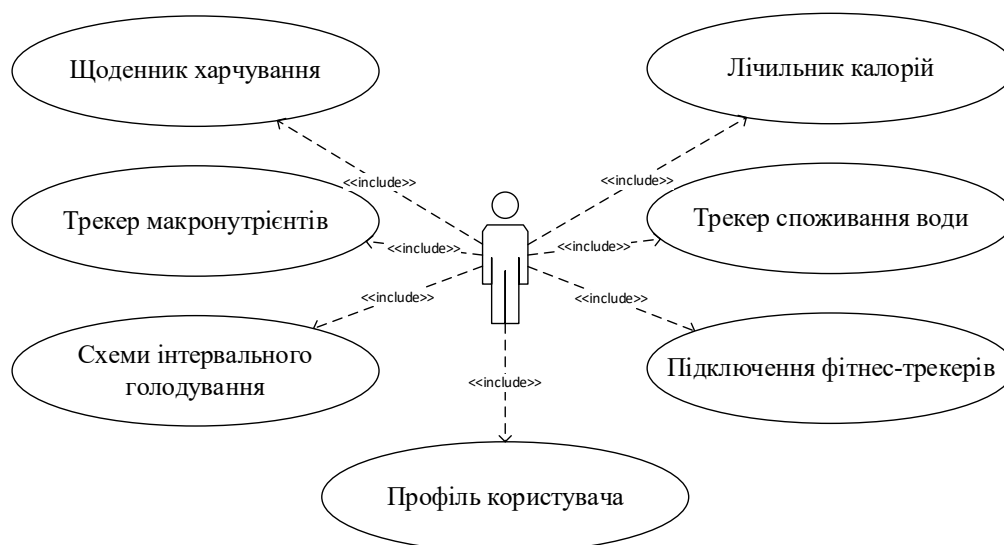


Рис. 1. Діаграма варіантів використання мобільного додатку



Рис. 2. Діаграма варіантів використання «Профіль користувача»

Проектування бази даних мобільного додатку.

Для проектування БД мобільного додатку було обрано СКБД SQLite.

Мобільний додаток містить у складі БД рецептів, продуктів харчування та опису складових речовин цих продуктів. В результаті аналізу універсального відношення із можливими атрибутами було отримано наступні об'єкти бази даних: продукт (product), складова речовина (ingredient), рецепт (recipe), одиниця виміру (unit) та користувач (user). Відповідно до цього розроблена база даних, що містить сім таблиць для п'яти об'єктів та двох таблиць зв'язку.

Об'єкт «Користувач» необхідний для персоніфікації інформації у додатку та у загальному випадку описує автора рецепта. Об'єкт «Рецепт» необхідний для збереження даних про унікальний рецепт. Зв'язок рецептів та продуктів необхідний для забезпечення відношення N до M. Об'єкт «Складова речовина» необхідний для збереження даних про складові речовини продуктів, наприклад, ω -3 поліненасичені жирні кислоти. Об'єкт «Одиниця виміру» необхідний для збереження даних про одиниці виміру продуктів та їх компонентів. Об'єкт «Продукт» необхідний для збереження даних про окремий харчовий продукт. Зв'язок продуктів та складових речовин необхідний для забезпечення відношення N до M. Структурну схему БД мобільного додатку подано на рис. 3.

БД SQLite вбудовано в Android за замовчуванням. Таким чином, немає необхідності виконувати будь-які завдання з налаштування бази даних або адміністрування. Основну функціональність роботи з базами даних надає пакет android.database. Функціональність безпосередньо для роботи з SQLite знаходиться у пакеті android.database.sqlite. База даних SQLite представлена класом android.database.sqlite.SQLiteDatabase. Він дозволяє виконувати запити до БД, виконувати з нею різні маніпуляції. Клас android.database.sqlite.SQLiteCursor надає запит і дозволяє повертати набір рядків, які відповідають цьому запиту. Клас android.database.sqlite.SQLiteQueryBuilder дозволяє створювати SQL-запити. SQL-вирази представлені класом android.database.sqlite.SQLiteStatement, які дозволяють за допомогою плейсхолдерів вставляти у вирази динамічні дані [7,8].

Класи БД подано на рис. 4.

Проектування архітектури мобільного програмного додатку.

Діаграма архітектури мобільного додатка візуально представляє елементи та компоненти дизайну програми.

Відповідно до загальноприйнятих архітектурних принципів у кожного додатка має бути як мінімум два шари [9,10]:

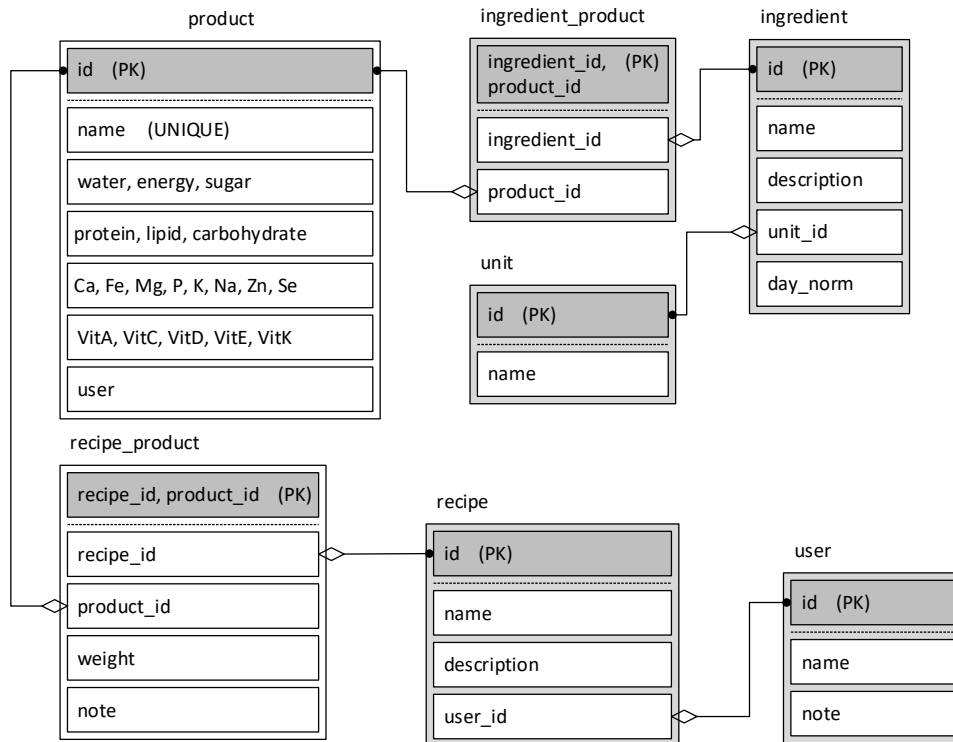


Рис. 3. Структурна схема бази даних

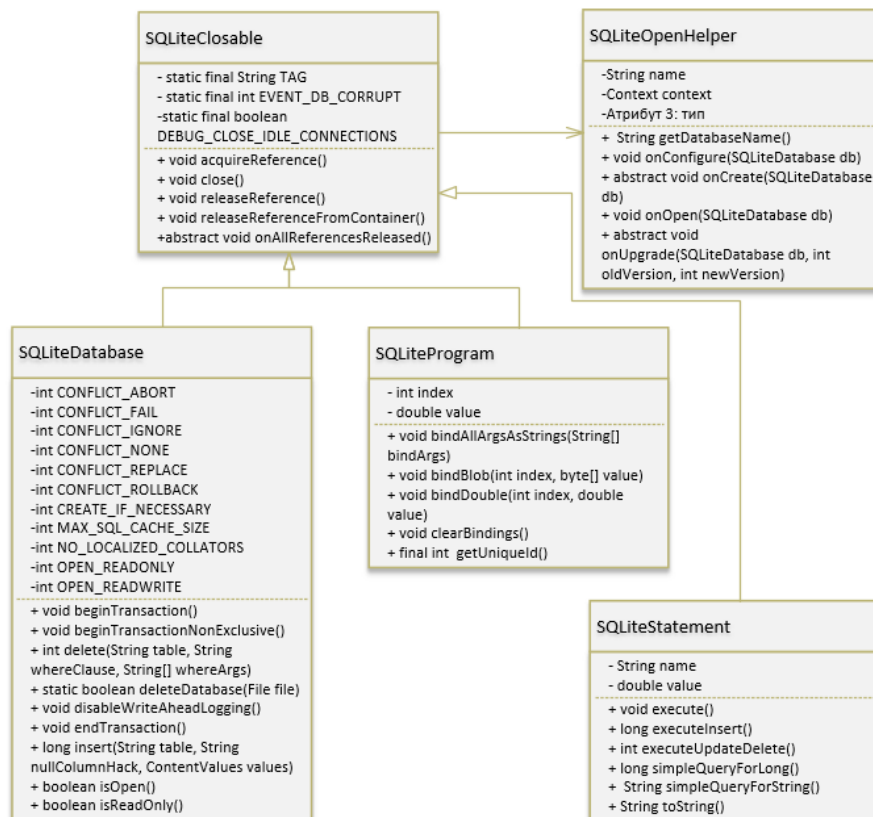


Рис. 4. Діаграма класів БД

1. Шар UI, який відображає дані програми на екрані.
2. Шар даних, який містить бізнес-логіку програми та відкриває доступ до даних програми.

Роль шару UI (або шару подання) – відображати дані програми на екрані. Якщо дані змінюються – через взаємодію з користувачем (наприклад, натискання кнопки) або зовнішнього впливу (наприклад, відгук мережі) – UI повинен оновитися і відобразити зміни.

Шар UI складається із двох частин [9,10]:

1. Елементи UI, які відображають дані на екрані. Створюються за допомогою View.
2. Екземплярів State Holder (наприклад, класів ViewModel), які зберігають дані, відкривають доступ до них для UI і працюють з логікою.

Шар даних у додатку містить бізнес-логіку – правила, за якими програма створює, зберігає та змінює дані [9,10].

Діаграму архітектури мобільного додатку подано на рис. 5.

Для реалізації поставлених завдань було обрано середовище розробки AndroidStudio та мову програмування Java.

Безпека в мобільному додатку забезпечується системою дозволів доступу на кожному конкретному пристрої Android. Ця система покликана захищати важливі дані та запобігати несанкціонованому доступу до інформації або каналів зв'язку. За замовчуванням у жодній Android-програми немає дозволу на проведення операцій, які можуть вплинути на ОС, особисті дані або інші програми. Дозволи є своєрідним фільтром для функціоналу програм, і тільки від користувача залежить, чи давати доступ до даних під час інсталяції.

В Android дозволи розділено на три типи: Normal Permissions, Signature Permissions, Dangerous Permissions.

Якщо ризик для конфіденційності користувача не дуже великий або взагалі відсутній, тоді дозвіл належить до категорії «Normal Permissions». Можна безпосередньо використовувати цю можливість, додавши дозвіл у файл AndroidManifest.xml.

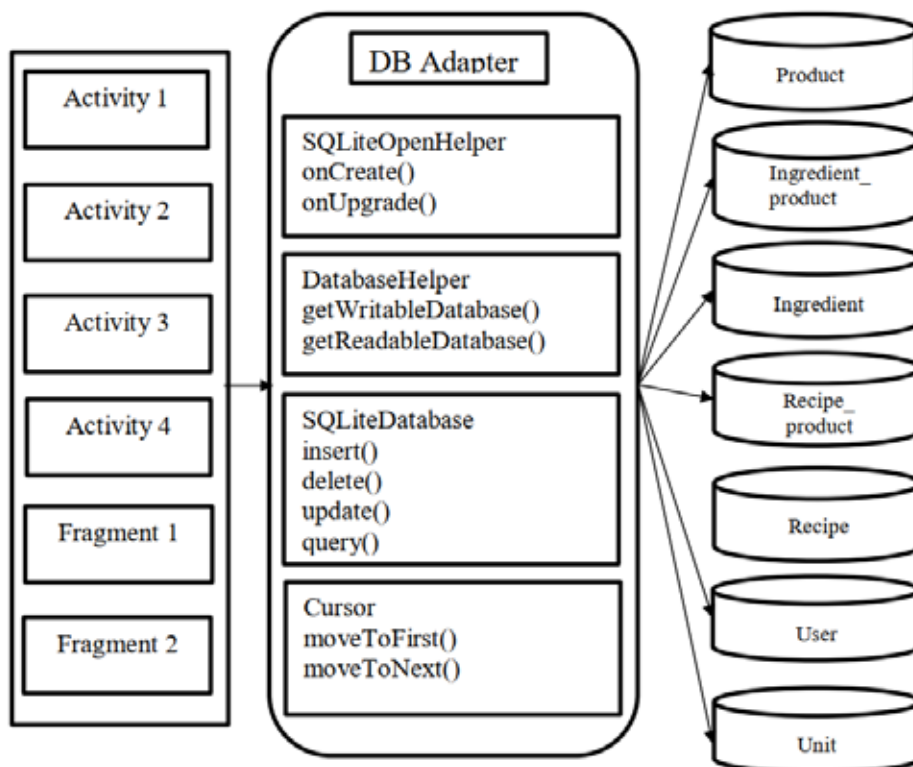


Рис. 5. Діаграма архітектури мобільного додатку

Нижче наведено дозволи, які було використано при розробці мобільного додатку. Всі ці дозволи входять у розділ «Normal Permissions»: BLUETOOTH, BLUETOOTH_ADMIN, INTERNET, SET_ALARM, SET_WALLPAPER, VIBRATE, WAKE_LOCK.

Система Android надає дозволи Signature Permissions під час встановлення, але є одна умова. Програма, яка запитує певний дозвіл, має бути підписана тим самим підписом, що й програма, яка визначає необхідний дозвіл. Нижче наведено деякі з дозволів Signature Permissions, які було використано при побудові мобільного додатку: BIND_ACCESSIBILITY_SERVICE, BIND_AUTOFILL_SERVICE, BIND_DEVICE_ADMIN, WRITE_SETTINGS, BIND_INPUT_METHOD.

До Dangerous Permissions належать ті дозволи, які так чи інакше включають дані користувача. Щоб використовувати небезпечні дозволи, необхідно явно запитати дозвіл перед використанням, показавши діалогове вікно попередження або будь-яке інше діалогове вікно. Якщо користувач відхиляє дозвіл, програма не може використовувати цей конкретний дозвіл.

Нижче наведено деякі з Dangerous Permissions, які було використано при побудові мобільного додатку: READ_CALENDAR, WRITE_CALENDAR, CAMERA, ACCESS_FINE_LOCATION, ACCESS_COARSE_LOCATION.

Приклади роботи програми подано на рис. 6.

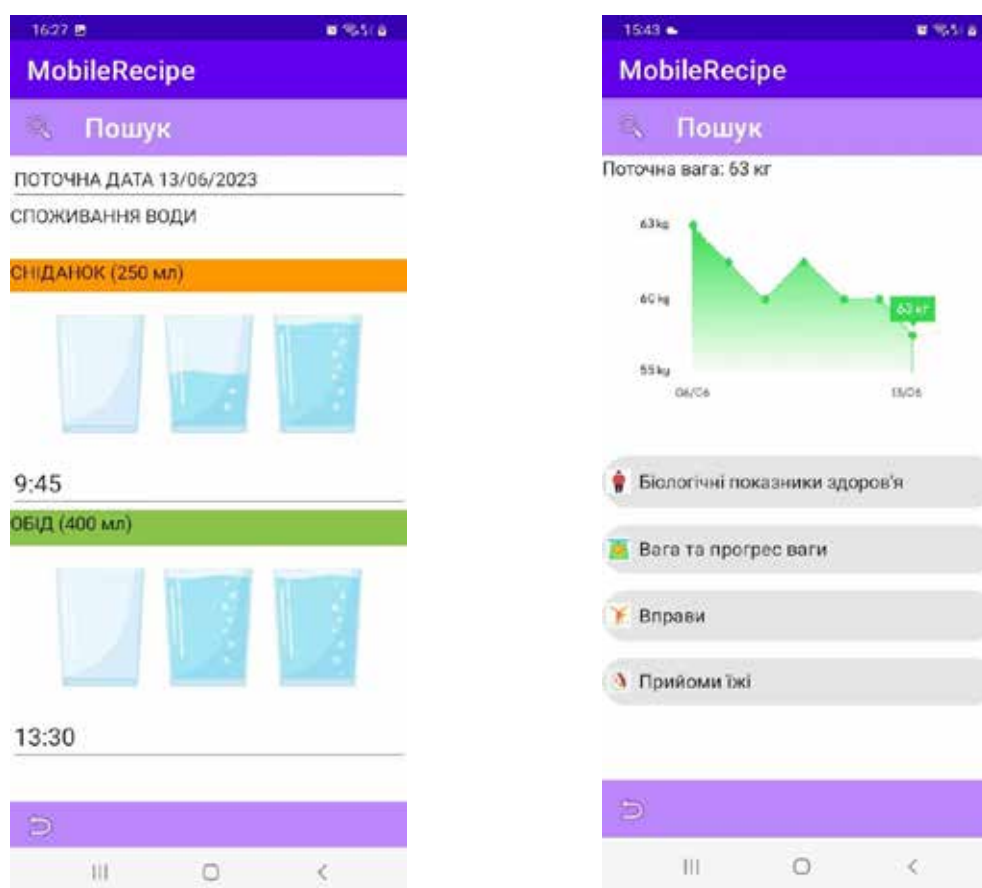


Рис. 6. Приклади роботи програми

Висновки. В роботі описано основні вимоги до програмного продукту, описано бізнес-логіку використання мобільного додатку, наведено методи обробки запитів доступу (Permissions), наведено опис функціональних можливостей мобільного додатку, наведено проектування бази даних, розроблено діаграму класів БД, описано процес проектування архітектури мобільного додатку, побудовано діаграму архітектури мобільного додатку.

Список використаних джерел:

1. Клочко О.М. Медична інформаційна система моніторингу стану здоров'я населення із захистом персональних даних. *Медична інформатика та інженерія*. 2020. № 1. С. 17-28.
2. Şentürk, Huseyin, Yakut, Onder, Bolat, Emine. Development of a mobile application based health tracking system. *Global Journal of Advance Engineering Technology and Sciences*. 2018. № 5. P. 14-19.
3. Ragda Mamoun, Mohamed Nasor, Sahar H. Abulikailik. Design and Development of Mobile Healthcare Application Prototype Using Flutter. *2020 International Conference on Computer, Control, Electrical, and Electronics Engineering (ICCEEE)*. 2021. P. 1-6.

4. Sharon, T. Self-Tracking for Health and the Quantified Self: Re-Articulating Autonomy, Solidarity, and Authenticity in an Age of Personalized Healthcare. *Philos. Technol.* 2017. № 30. P. 93–121.
5. Umer W. Agile Scrum Crash Course: A Guide To Agile Project Management and Scrum Master Certification PSM 1. *Independently published*. 2020. 151 p.
6. Dave Todaro. The Epic Guide to Agile: More Business Value on a Predictable Schedule with Scrum. *R9 Publishing LLC*. 2019. 518 p.
7. Sujit Kumar Mishra. Fundamentals of Android App Development: Android Development for Beginners to Learn Android Technology, SQLite, Firebase and Unity. *BPB Publications*. 2020. 92 p.
8. K. L. JAMES. Android Applications Development in Java. *B09Q4P71G8*, 2022. 408 p.
9. Bryan Sills, Brian Gardner, Kristin Marsicano. Android Programming: The Big Nerd Ranch Guide (Big Nerd Ranch Guides). *Addison-Wesley Professional*. 2022. 688 p.
10. G. Meike, Lawrence Schiefer. Inside the Android OS: Building, Customizing, Managing and Operating Android System Services (Android Deep Dive). *Addison-Wesley Professional*. 2021. 272 p.

References:

1. Klyuchko O.M. (2020). Medychna informatsiina systema monitorynhu stanu zdorovia naselennia iz zakhystom personalnykh danykh. Medychna informatyka ta inzheneriia [Medical information system for monitoring of the health state of population with protection of personal data]. *Medychna informatyka ta inzheneriia – Medical Informatics and Engineering*, 1, 17-28 [in Ukrainian].
2. Şenturk, Huseyin, Yakut, Onder, Bolat, Emine. (2018). Development of a mobile application based health tracking system. *Global Journal of Advance Engineering Technology and Sciences*, 5, 14-19 [in English].
3. Ragda Mamoun, Mohamed Nador, Sahar H. Abulikailik. (2021). Design and Development of Mobile Healthcare Application Prototype Using Flutter. *2020 International Conference on Computer, Control, Electrical, and Electronics Engineering (ICCCEEE)*, 1-6 [in English].
4. Sharon, T. (2017). Self-Tracking for Health and the Quantified Self: Re-Articulating Autonomy, Solidarity, and Authenticity in an Age of Personalized Healthcare. *Philos. Technol.* 30, 93–121 [in English].
5. Umer W. (2020). Agile Scrum Crash Course: A Guide To Agile Project Management and Scrum Master Certification PSM 1. *Independently published*, 151 [in English].
6. Dave Todaro. (2019). The Epic Guide to Agile: More Business Value on a Predictable Schedule with Scrum. *R9 Publishing LLC*, 518 [in English].
7. Sujit Kumar Mishra. (2020). Fundamentals of Android App Development: Android Development for Beginners to Learn Android Technology, SQLite, Firebase and Unity. *BPB Publications*, 92 [in English].
8. K. L. JAMES. (2022). Android Applications Development in Java. *B09Q4P71G8*, 408 [in English].
9. Bryan Sills, Brian Gardner, Kristin Marsicano. (2022) Android Programming: The Big Nerd Ranch Guide (Big Nerd Ranch Guides). *Addison-Wesley Professional*, 688 [in English].
10. G. Meike, Lawrence Schiefer. (2021). Inside the Android OS: Building, Customizing, Managing and Operating Android System Services (Android Deep Dive). *Addison-Wesley Professional*, 272 [in English].

УДК 517.977.5

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.2.6>

Андрій НЕСТЕРУК

аспірант кафедри інформаційних систем та технологій, асистент кафедри інформаційних систем та технологій, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», проспект Перемоги, 37, Київ, Україна, індекс 03056 (aonesterukr@gmail.com)

ORCID: 0000-0002-1563-7245

Богдан КОРНІЄНКО

доктор технічних наук, професор кафедри інформаційних систем та технологій, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», проспект Перемоги, 37, Київ, Україна, індекс 03056 (bogdanko@gmx.net)

ORCID: 0000-0002-2521-0878

Andrii NESTERUK

graduate student of the Department of Information Systems and Technologies, assistant of the Department of Information Systems and Technologies, National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorskyi Kyiv Polytechnic Institute", 37 Peremogy Avenue, Kyiv, Ukraine, postal code 03056 (aonesterukr@gmail.com)

Bogdan KORNIYENKO

Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Information Systems and Technologies, National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 37 Peremogy Avenue, Kyiv, Ukraine, postal code 03056 (bogdanko@gmx.net)

Бібліографічний опис статті: Нестерук, А., Корнієнко, Б. Математична модель процесу виробництва мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженим шаром. *Інформаційні технології та суспільство*. 2023. Вип. 2(8). 51–61. DOI: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.2.6>

Bibliographic description of the article: Nesteruk, A., Kornienko, B. (2023). Matematychna model protsesu vyrobnytstva mineralnykh dohryv u hranuliatori z psevdozridzhenym sharom [Mathematical model of the process of production of mineral fertilizers in a fluidized bed granulator]. *Informatsiini tekhnolohii ta suspilstvo – Information technology and society*, 2(8), 51–61. DOI: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.2.6>

**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРИВ
У ГРАНУЛЯТОРІ З ПСЕВДОЗРІДЖЕНИМ ШАРОМ**

Проведено аналіз підходів до математичного моделювання процесу виготовлення мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженим шаром. Розроблено математичну модель процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі, що розглядає процес як гетерогенний та трифазний, під час якого між собою взаємодіють три окремі фази: частинки – центри гранулювання, вихідна речовина – сульфат амонію у вигляді крапель та теплоносії – повітря. Математична модель враховує гідродинаміку псевдозрідженого шару, передачу кінетичної енергії, розсіювання енергії, стиснення крапель з частинками, їх адгезію до поверхні, кінетику сушіння розчину на поверхні частинок. Запропонована математична модель може використовуватись для побудови інформаційної технології управління процесом гранулювання у псевдозрідженому шарі.

Ключові слова: псевдозріджений шар, математична модель, гранулювання, мінеральні добрива.

**MATHEMATICAL MODEL OF THE PROCESS OF PRODUCTION
OF MINERAL FERTILIZERS IN A FLUIDIZED BED GRANULATOR**

An analysis of approaches to mathematical modeling of the process of the process of manufacturing mineral fertilizers in a fluidized bed granulator was carried out. A mathematical model of the granulation process in a fluidized bed has been developed, which considers the process as heterogeneous and three-phase, during which three separate phases interact with each other: particles – granulation centers, starting material – ammonium sulfate in the form of drops, and coolant – air. The mathematical model takes into account the hydrodynamics of the fluidized bed, the transfer of kinetic energy, the dissipation of energy, the compression of droplets with particles, their adhesion to the surface, the kinetics of drying the solution on the surface of the particles. The proposed mathematical model can be used to build information technology for managing the granulation process in a fluidized bed.

Key words: fluidized bed, mathematical model, granulation, mineral fertilizers.

Постановка проблеми. Промислове застосування методу псевдозрідження викликано суттєвим переліком його переваг. У псевдозрідженому шарі відбувається активне перемішування твердої фази, якість обробки якої безпосередньо впливає на якість готового продукту. Також гранулятори псевдозрідженого шару мають відносно просту конструкцію, непогано піддаються механізації та автоматизації.

При сучасних світових тенденціях до зростання споживання продукції різних галузей промисловості та екологічній ситуації гостро постає проблема раціонального використання в промисловому виробництві енергетичних та сировинних ресурсів з метою одержання максимальної кількості готового продукту заданої якості. Важливим етапом вирішення цієї задачі є створення адекватної математичної моделі процесу.

Математична модель має правильно відображати технологічний процес, його характерні риси, але також не має бути переускладнена деталями, що несуттєво впливають на вирішення поставленої задачі. Отримання адекватної моделі апарату дозволяє коректно розробити реальну для втілення стратегію керування технологічним процесом.

Аналіз попередніх досліджень. Апарати із псевдозрідженим шаром відіграють важливу роль у широкому міжгалузевому спектрі технологічних процесів, тому вдосконалення та модернізація існуючих, а також розробка нових високоефективних конструкцій апаратів із псевдозрідженим шаром безпосередньо відповідає пріоритетному напрямку технологічного розвитку не лише хімічної технології, а й суміжних галузей.

Широке застосування апаратів із псевдозрідженим шаром призвело до розробки значної кількості моделей, що описують гідромеханіку процесу псевдозрідження. Облік у таких моделях різних факторів, що визначають кінетику сумарного процесу або його окремих стадій, призвів до формування ще ширшого діапазону моделей для розрахунку хіміко-технологічних процесів у шарі. Однак існуюче розмаїття підходів мало просунуло інженерні методи розрахунку, які значною мірою продовжують спиратися на балансові співвідношення та уявлення шару як системи із зосередженими параметрами, де реальний розподіл параметрів компенсується введенням численних емпіричних коефіцієнтів, що визначаються експериментально на вже існуючих апаратах з псевдозрідженим шаром. Такий підхід не завжди здатний забезпечити необхідну точність прогнозу, особливо при зміні конструктивних елементів апарату або виході режимних параметрів за кордон дослідженого діапазону. Крім того, виключається постановка та вирішення завдань оптимального управління процесами, що може становити значний резерв підвищення ефективності їх проведення. Різноманітні моделі, що пропонують глибший математичний аналіз процесів у псевдозрідженому шарі, що розглядають умовно нескінченно малий обсяг шару могли б дати відповіді на багато питань, що виникають під час експлуатації та проектування. Однак подібні моделі практично недоступні для інженерної практики через їх складність та обчислювальну громіздкість, а головне, перевантаженість численними параметрами, ідентифікація яких скрутна або неможлива. Таким чином, розробка ефективних математичних інструментів для опису протікання процесів в апаратах з псевдозрідженим шаром залишається актуальною.

Метою статті є розробка нової математичної моделі процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі для подальшої розробки системи керування на її основі.

Виклад основного матеріалу.

Переваги апаратів псевдозрідженого шару

В апаратах псевдозрідженого шару здійснюється контакт між розвиненою поверхнею дисперсної твердої фази, власне тої, що складає шар, і вертикальним потоком зважуючого потоку газу (рідше крапельної рідини). Розвинена поверхня контакту твердої та газової фаз необхідна для проведення процесів теплообміну, випалювання, горіння, сушки, каталітичних процесів за участю дисперсних каталізаторів, адсорбції та ін.

У порівнянні з іншими апаратами, в яких також відбувається контакт дисперсної твердої і газової (рідкої) фаз (частіше це апарати з нерухомим шаром, що фільтрується) апарати з псевдозрідженим шаром володіють наступними перевагами:

- відносна простота конструкції – найчастіше це вертикальний апарат з прямокутним або круглим перетином, зазвичай не має рухомих частин;
- практична ізотермічність всього обсягу, забезпечується інтенсивним перемішуванням дисперсної фази, має велике значення для більшості процесів з виділенням або поглинанням теплоти;
- можливість підвищення витрат зважувального газу без збільшення перепаду тиску на шарі матеріалу, що є суттєвим зважаючи на обмеженість напорів, що розвиваються вентиляторами великої продуктивності;
- текучість шару, яка дозволяє безперервно вивантажувати дисперсний матеріал через простий патрубок.

Недоліки апаратів з псевдозрідженим шаром дисперсного матеріалу пов'язані з інтенсивним перемішуванням в обсязі шару, наприклад:

- знос конструкційних матеріалів, а також ерозія внутрішніх поверхонь апарату гранулювання;
- виникнення електростатичного заряду на поверхні псевдозріджуваних діелектричних матеріалів;
- різні часи перебування окремих порцій дисперсного матеріалу (його окремих частинок) в обсязі шару, що призводить до різного ступеня обробки (нагрівання, випалювання, вигорання, висушування, адсорбції, розмірів гранул або кристалів і ін.) різних частин загального потоку, що вивантажується з апарату дисперсного матеріалу.

Процес псевдозрідження забезпечує рівномірну структуру псевдозрідженого шару тільки при використанні в якості псевдозріджувача крапельних рідин. При псевдозрідженні відносно легкими і малов'язкими газами в шарі утворюються газові бульбашки, всередині яких контакт дисперсного матеріалу з суцільним середовищем практично відсутній, що особливо суттєво, наприклад, для каталітичних процесів. При псевдозрідженні дуже дрібних частинок (менше 1 мм в діаметрі) майже неможливо запобігти утворенню каналів, що в більшому ступені погіршує якість міжфазного контакту в шарі. Кращими для забезпечення рівномірності псевдозрідження є монодисперні, округлі частинки з мінімальною поверхневою адгезією (хорошою сипучістю).

На внутрішню структуру псевдозрідженого шару в значній мірі впливає пристрій (конструкція) газорозподільної решітки в нижній частині апарату, через яку в шар подається псевдозріджувачий агент.

При гранулюванні розчинів зневодненням на перший план висувається вимога отримання продукту, що має певний гранулометричний склад. В загальному випадку механізм росту гранул залежить від властивостей використаних речовин, режиму процесу та інших факторів, що визначають характер взаємодії диспергованих рідкої та твердої фаз.

В нашому випадку численні дослідження підтвердили, що найбільше на стан готового продукту, основним показником якості якого є еквівалентний діаметр часток, впливає температура псевдозрідженого шару, в якому вони формуються. Саме тому її обрано головною керованою величиною в апараті, що розглядається. Розглянемо побудову апарату для гранулювання речовин у псевдозрідженому шарі. У гранулятор 1 із псевдозрідженим шаром за допомогою виконавчого пристрою 2 подають розчин, а виконавчим пристроєм 3 подають центри грануляції. Знизу до верху подається нагрітий теплоносіє – повітря. Готовий продукт – гранули вивантажують за допомогою виконавчого пристрою 4.

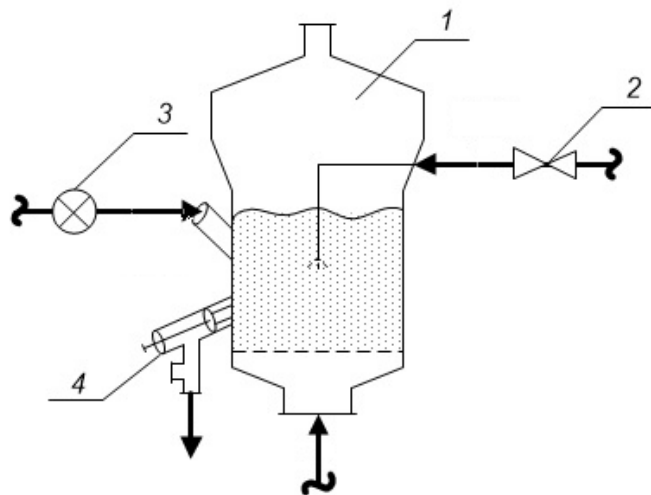


Рис. 1. Апарат для гранулювання термолабільних речовин у псевдозрідженому шарі:
1 – гранулятор, 2 – пристрій для введення вихідного розчину, 3 – пристрій для введення частинок; 4 – пристрій для вивантаження готового продукту

В апаратах із псевдозрідженим шаром гранулювання здійснюється розпилювання пульп, розчинів або плавів на поверхню зріджених частинок. При цьому на частинках відкладаються тонкі плівки гранульованої речовини, де вони висушуються, кристалізуються, збільшуючи тим самим розмір гранул до необхідної величини. Інша (незначна) частина, яка вводиться всередину шару розчину, висихає в зоні

розпили, утворюючи дрібні сухі частинки, з яких одні несуться газовим потоком з апарату (винесення), інші залишаються в апараті в якості внутрішнього ретур (нових центрів гранулоутворення).

До основних переваг даного способу відносяться: невеликі габарити і висока продуктивність установок; сферична форма гранул готового продукту; отримання продукту необхідного хімічного та гранулометричного складу; інтенсифікація тепло-і масообмінних процесів за рахунок максимального ступеня контакту між твердими частками зваженого шару і газовим теплоносієм; автоматизоване управління роботою установки. До недоліків способу відносяться: пилевинос і ретельне очищення газу, що відходить з апарату; різний час перебування частинок в апараті.

В зв'язку із постійним зростанням масштабів виробництва та відповідно апаратів із псевдозрідженим шаром значні труднощі виникають із урахуванням явищ взаємодії газу та частинки (сили опору) та взаємодії частинка-частинка (сили зіткнення). Вирішення цих проблем шляхом тривалих досліджень на пілотних установках є досить дорогим.

Для полегшення процесу проектування апаратів із псевдозрідженим шаром корисним інструментом може бути комп'ютерне моделювання. Основні ж труднощі при моделюванні апаратів із псевдозрідженим шаром у натуральну величину пов'язані із великою різницею масштабів: найбільші структури потоку можуть бути порядку декількох метрів, деякі структури можуть напряму залежати від зіткнень частинка-частинка та взаємодії частинка-газ, що відбуваються на міліметровому рівні.

Огляд методів математичного моделювання процесів дегідrataції та грануляції в киплячому шарі

Модель балансу використовується для опису зміни гранулометричного складу процесу гранулювання в киплячому шарі [1-2]. Загальне рівняння балансу на основі довжини пакетного режиму, яке описує швидкість зміни функції густини числа частинок $n(t, L)$, задається таким чином [3]:

$$\frac{\partial n(t, L)}{\partial t} = B(t, L) \quad (1)$$

$$- \frac{\partial}{\partial L}(G(t, L)n(t, L)) \quad (2)$$

$$+ \frac{L^2}{2} \int_0^{\frac{1}{L^3}} \beta(t, (L^3 - \lambda^3)^{\frac{1}{3}}) n(t, (L^3 - \lambda^3)^{\frac{1}{3}}) n(t, \lambda) d\lambda - n(t, L) \int_0^{\infty} \beta(t, L, \lambda) n(t, \lambda) d\lambda \quad (3)$$

$$+ \int_L^{\infty} S(t, \lambda) b(t, L | \lambda) n(t, \lambda) d\lambda - S(t, L) n(t, L) \quad (4)$$

Зростання гранул в апараті з киплячим шаром відбувається в основному за рахунок нашарування. При цьому необхідно враховувати агрегацію частинок. Для моделювання балансу використовується лише одне ядро грануляційного росту в киплячому шарі [2]:

$$G = \frac{2(1-b)\Phi}{\pi \int_0^{\infty} n L^2 dL} \quad (5)$$

У дискретному методі рівняння моделі балансу розв'язується для кожного розмірного інтервалу. Тому перевага цього методу в тому, що в результаті ми отримаємо розподіл частинок за розміром.

Моментний метод – це варіант розв'язання балансової моделі за моментних умов, який визначається як:

$$m_k(t) = \int_0^{+\infty} n(L; t) L^k dL \quad (6)$$

Моменти тісно пов'язані з важливими інтегральними величинами сукупності частинок, такими як середня або загальна площа поверхні та об'єм частинок. Порівняно з балансовою моделлю, чисельне рішення потребує меншої обчислювальної потужності.

Розвиток комп'ютерних технологій дозволив використовувати гідродинамічну модель, яка описує динаміку взаємодії газу і твердих частинок. Для моделювання в грануляторі з киплячим шаром існує дві різні категорії гідродинамічних моделей: модель Ейлера та модель Лагранжа [4].

Модель Ейлера дозволяє включати декілька твердих речовин вторинної фази. Збереження маси та імпульсу виконується відповідно для кожної фази. Таким чином, модель Ейлера розв'язує набір із n рівнянь неперервності та імпульсу, що робить цей підхід однією з найскладніших багатофазних моделей.

Модель Ейлера-Ейлера, відома як модель континууму або модель двох рідин, описує еволюцію взаємодії між твердою та газовою фазами. Взаємодія між двома фазами залежить від гідравлічного опору між фазами, тобто локальних відносних швидкостей фаз і локальних об'ємних часток фаз. У результаті моделювання методу обчислювальної гідродинаміки на основі схеми Ейлера-Ейлера прийнято для дослідження багатофазного потоку газ-тверді тіла в грануляторі з киплячим шаром [5-7].

Модель Лагранжа вирішує рівняння руху для кожної гранули, враховуючи зіткнення частинок і сили, що діють на частинку з боку газу. Тому, коли кількість частинок велика, краще використовувати моделі Ейлера-Ейлера [8-10].

Модель Лагранжа-Ейлера описує газові бульбашки як дискретні частинки, які можуть стикатися, об'єднуватися, зупинятися, стискатися та рости. Модель Ейлера не підходить для твердої фази, але вона підходить для опису емульсії газової фази і частинок [11-19].

Математична модель процесу виробництва мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженням шару

Розроблена математична модель враховує гідродинаміку псевдозрідженого шару, передачу кінетичної енергії, розсіювання енергії, стиснення крапель з частинками, їх адгезію до поверхні, кінетику висихання розчину на поверхні частинок [20-28]. Систему рівнянь розроблено з урахуванням емпіричних співвідношень для розрахунку питомої швидкості зневоднення, питомої швидкості осадження крапель на частинках в результаті адгезії, коефіцієнта осьового розсіювання частинок, коефіцієнтів тепловіддачі, коефіцієнта для розрахунку втрата матеріалу і товщина шару покриття, а також початкових умов [29-32].

Зростання гранул тим імовірніше, чим більше сила зчеплення крапель рідини з твердими частинками і її швидкість. Адгезивні властивості краплі, в свою чергу, залежать від твердості поверхні гранул і властивостей розпиленої речовини.

При створенні моделі, процес грануляції в киплячому шарі розглядався як трифазний гетерогенний процес, у якому взаємодіють три компоненти: частинки, вихідний розчин і теплоносії [33-37]. Під час моделювання було прийнято, що параметри псевдозрідженого шару змінюються з часом без урахування зміни висоти та радіальної складової, теплообмін між усіма компонентами процесу конвективний, частинки монодисперсні, немає пористості та агломерації, краплі мають вузький розподіл за розмірами, між краплями не стикаються, злипаються і прилипають до стінок корпусу [38-42].

Для опису процесу теплообміну в грануляторі використовувалася система рівнянь:

– Зміна температури частинок:

$$M_p C_p \frac{d\Theta_p}{dt} = a_p S_p (\Theta_a - \Theta_p) - M_p v_{dry} Q_{dry} + G_d x_d Q_{cryst} + \\ + M_p C_p r_p \Theta_{p0} + R_{ad} M_p C_d (\Theta_d - \Theta_p) - \gamma_\Theta - \Phi_{ps} \quad (7)$$

де a_p – коефіцієнт теплопередачі частинок, $Bm/(M^2 \cdot K)$; S_p – площа поверхні частинок, m^2 ; Θ_a – температура теплоносія, K ; Θ_p – температура частинок, K ; M_p – маса частинок, kg ; v_{dry} – питома швидкість висихання вологи на частинках або в краплях, $kg/(kg \cdot s)$; Q_{dry} – питома теплота висихання крапель, $Дж/кг$; G_d – масова витрата крапель, kg/s ; x_d – концентрація крапель розчину; Q_{cryst} – питома теплота кристалізації крапель, $Дж/кг$; M_p – маса частинок, kg ; C_p – питома теплоємність частинок, $Дж/(кг \cdot K)$; r_p – коефіцієнт осьового розсіювання частинок, $1/s$; Θ_{p0} – початкова температура частинок, K ; R_{ad} – питома швидкість стікання крапель з частинками, $kg/(kg \cdot s)$; C_d – питома теплоємність краплі, $Дж/(кг \cdot K)$; Θ_d – температура перепадів, K ; γ_Θ – розсіювання енергії при зіткненні, $Дж/с$; Φ_{ps} – передача кінетичної енергії, $Дж/с$.

– Зміна температури крапель:

$$M_d C_d \frac{d\Theta_d}{dt} = M_d C_d \Theta_{d0} - R_{ad} M_p C_d (\Theta_d - \Theta_p) + \\ + M_p v_{dry} Q_{dry} + a_d S_d (\Theta_a - \Theta_d) \quad (8)$$

де M_d – маса крапель, kg ; C_d – питома теплоємність краплі, $Дж/(кг \cdot K)$; Θ_{d0} – початкова температура крапель, K ; R_{ad} – питома швидкість стікання крапель з частинками, $kg/(кг \cdot s)$; M_p – маса частинок, kg ; Θ_d – температура перепадів, K ; Θ_p – температура частинок, K ; v_{dry} – питома швидкість висихання

вологи на частинках або в краплях, $\text{кг}/(\text{кг}^*\text{с})$; Q_{dry} – питома теплота висихання крапель, $\text{Дж}/\text{кг}$; ad – коефіцієнт теплопередачі крапель, $\text{Вт}/(\text{м}^2*\text{К})$; S_d – площа поверхні крапель, м^2 ; θ_a – температура теплоносія, К .

– Зміна температури теплоносія:

$$M_a C_a \frac{d\theta_a}{dt} = G_a (C_a \theta_{a0} - C_a \theta_a) - a_p S_p (\theta_a - \theta_p) - a_d S_d (\theta_a - \theta_d) \quad (9)$$

де G_a – масова витрата теплоносія, $\text{кг}/\text{с}$; C_a – питома теплоємність теплоносія, $\text{Дж}/(\text{кг}^*\text{К})$; θ_{a0} – початкова температура теплоносія, К ; θ_a – температура теплоносія, К ; a_p – коефіцієнт теплопередачі частинок, $\text{Вт}/(\text{м}^2*\text{К})$; S_p – площа поверхні частинок, м^2 ; θ_p – температура частинок, К ; ad – коефіцієнт теплопередачі крапель, $\text{Вт}/(\text{м}^2*\text{К})$; S_d – площа поверхні крапель, м^2 ; θ_d – температура перепадів, К ; M_a – маса теплоносія, кг .

Питома швидкість течії крапель з частинками може бути розрахована за такою формулою:

$$R_{ad} = \frac{G_d}{M_{p0}} x_d = \frac{G_d}{M_{p0}} \left(\frac{St_d}{St_d + 0.35} \right) \quad (10)$$

де M_{p0} – початкова маса частинок, кг ; G_d – масова витрата крапель, $\text{кг}/\text{с}$; St_d – число Стокса для крапель, яке можна розрахувати за такою формулою:

$$St_d = \frac{\rho_d v_a d_d^2}{\mu_a d_p} \quad (11)$$

де ρ_d – густина крапель, $\text{кг}/\text{м}^3$; v_a – швидкість руху теплоносія, $\text{м}/\text{с}$; d_d – діаметр крапель, м ; μ_a – динамічна в'язкість теплоносія, $\text{Па}^*\text{с}$; d_p – діаметр частинок, м .

Розсіювання енергії зіткнення – це швидкість розсіювання енергії всередині твердої фази внаслідок зіткнень між частинками. Це явище моделюється за допомогою кореляції Луна:

$$\gamma_\Theta = \frac{12(1 - e_p^2)g_0}{d_p \sqrt{\pi S_p}} \rho_p a_p^2 \Theta_p^{1.5} \quad (12)$$

де e_p – коефіцієнт відновлення зіткнення частинок з іншими частинками, g_0 – функція радіального розподілу, d_p – діаметр частинок, м ; S_p – площа поверхні частинок, м^2 ; ρ_p – густина частинок, $\text{кг}/\text{м}^3$; a_p – коефіцієнт теплопередачі частинок, $\text{Вт}/(\text{м}^2*\text{К})$; θ_p – температура частинок, К .

Передачу кінетичної енергії випадкових частинок із твердої фази в рідку можна розрахувати за формулою:

$$\phi_{ps} = \frac{-3K_{ps} \Theta_p}{S_p} \quad (13)$$

де K_{ps} – коефіцієнт сили взаємодії рідини з твердим тілом, S_p – площа поверхні частинки, м^2 ; θ_p – температура частинок, К .

Кількість тепла, що виділяється при видаленні вологи з поверхні крапель, можна переписати так:

$$M_a v_{dry} Q_{dry} = \beta \frac{M_{h2o} S_p}{R \Theta_p} \Delta P Q_{dry} \quad (14)$$

де β – коефіцієнт масопередачі, $\text{м}/\text{с}$; M_{h2o} – молекулярна маса води, $\text{г}/\text{моль}$; R – універсальна газова стала, $(\text{м}^2*\text{кг})/(\text{с}^2*\text{К}^*\text{моль})$; ΔP – різниця парціального тиску, Па .

Аналіз числових результатів математичної моделі

Для отримання динамічних результатів розробленої математичної моделі створено програму розрахунку даної математичної моделі методом Рунге-Кутта 4-го порядку на мові програмування Python. За допомогою вбудованих математичних бібліотек були проведені розрахунки та візуалізована температурна поведінка частинок і крапель з моменту включення установки до завершення процесу.

Для моделювання були використані наступні значення, наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Назва	Позначення	Значення
Маса частинок	M_p	1.5
Маса крапель	M_d	2
Маса теплового носія	M_a	3.5
Початкова маса частинок	M_{p0}	1.53
Питома теплоємність крапель	C_d	1590
Питома теплоємність частинок	C_p	1420
Питома теплоємність теплоносія	C_a	1011
Початкова питома теплоємність теплоносія	C_{a0}	1015
Початкова температура частинок	θ_{p0}	300
Початкова температура крапель	θ_{d0}	293
Початкова температура теплоносія	θ_{a0}	393
Коефіцієнт осьового розсіювання частинок	r_p	$1 \cdot 10^{-5}$
Питома швидкість висихання вологи по частинках або по краплях	v_{dry}	0.47
Питома теплота кристалізації крапель	Q_{cryst}	82300
Питома теплота сушіння крапель	Q_{dry}	5000
Коефіцієнт теплопередачі частинок	a_p	5.57
Коефіцієнт теплопередачі крапель	a_d	5.535
Площа поверхні частинок	S_p	$7.07 \cdot 10^{-7}$
Площа поверхні крапель	S_d	$6.07 \cdot 10^{-6}$
Масовий потік крапель	G_d	0.7
Масова витрата теплоносія	G_a	1
Концентрація розчину падає	x_d	0.37

Після розрахунків отримуємо графік залежності температур крапель, крапель і часу від часу, що показано на рисунку 2:

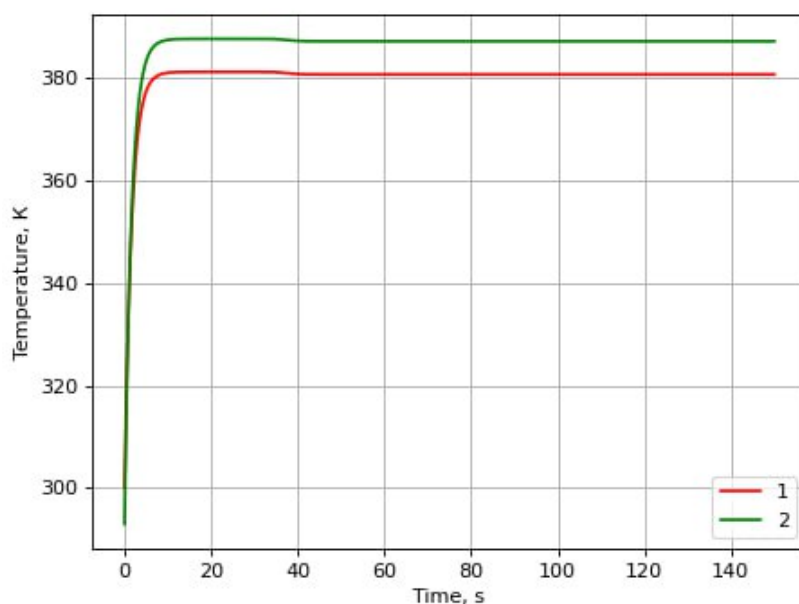


Рис. 2. Графік залежності температур частинок, крапель і повітря від часу (1 – температура частинок, 2 – температура крапель)

Для підтримки стабільної роботи апаратів з псевдозрідженим шаром у необхідному гідродинамічному режимі всередині них необхідно розробити ефективну систему керування процесом зневоднення та гранулювання. Якість цієї системи управління тісно пов'язана з точністю математичної моделі об'єкта, для якого ця система управління розробляється. Отримані результати розрахунку математичної моделі доводять, що вона може слугувати основою для розробки ефективної системи управління. Запропонована математична модель може бути використана для побудови інформаційної технології управління процесом гранулювання в псевдозрідженому шарі.

Висновки. Запропоновано математичну модель процесу виробництва мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженим шаром, яка може слугувати основою для створення системи керування процесом гранулювання та зневоднення в псевдозрідженому шарі. Представлена математична модель виражає теплообмін між краплями, частинками та теплоносієм з урахуванням таких параметрів, як гідродинаміка киплячого шару, передача кінетичної енергії, розсіювання енергії, стиснення крапель з частинками, їх адгезія до поверхні, кінетика висихання розчину, на поверхні частинок.

Чисельно розраховано математичну модель процесу виробництва мінеральних добрив у грануляторі з киплячим шаром і встановлено, що для стабілізації температури системи потрібно 38 секунд, температура частинок стабілізується на рівні 381К, а температура крапель при 387К.

Список використаних джерел:

1. Adetayo, A.A., et al. Population balance modelling of drum granulation of materials with wide size distribution. *Powder Technology*. 1995. № 82(1). P. 37-49.
2. Vreman, A.W., van Lare C.E., Hounslow M.J. A basic population balance model for fluid bed spray granulation. *Chemical Engineering Science*. 2009. № 64(21). P. 4389-4398.
3. Syamlal M., Rogers W., O. Brien T. J, MFIX Documentation: Volume1, Theory Guide. National Technical Information Service, Springfield, VA. DOE/METC9411004, NTIS/DE94000871993.
4. Gidaspow D., R.B. and J.D. Hydrodynamics of Circulating Fluidized Beds, Kinetic Theory Approach. In *Fluidization VII. Proceeding of the 7th Engineering Foundation Conference on Fluidization*. 1992. P. 75-82.
5. Lun C.K.K. et al. Kinetic Theories for Granular Flow: Inelastic Particles in Couette Flow and Slightly Inelastic Particles in a General Flow Field. *Journal of Fluid Mechanics*. 1984. № 140. P. 223-256.
6. Kornienko Y.M., Haidai S.S., Sachok R.V., Liubeka A.M., Korniyenko B.Y. Increasing of the heat and mass transfer processes efficiency with the application of non-uniform fluidization. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2020. № 15(7). P. 890-900.
7. Korniyenko B., Galata L., Ladieva L. Mathematical model of threats resistance in the critical information resources protection system. Paper presented at the CEUR Workshop Proceedings. 2019. № 2577. P. 281-291.
8. Korniyenko B., Kornienko Y., Haidai S., Liubeka A., Hulienko S. Conditions of Non-uniform Fluidization in an Auto-oscillating Mode. *Advances in Computer Science for Engineering and Manufacturing. ISEM 2021. Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022. № 463. P. 14-27.
9. Korniyenko B., Kornienko Y., Haidai S., Liubeka A. The Heat Exchange in the Process of Granulation with Non-uniform Fluidization. *Advances in Computer Science for Engineering and Manufacturing. ISEM 2021. Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022. № 463. P. 28-37.
10. Korniyenko B., Galata L., Ladieva L. Research of Information Protection System of Corporate Network Based on GNS3. 2019 IEEE International Conference on Advanced Trends in Information Theory, ATIT 2019 – Proceedings. 2019. № 9030472. P. 244-248. DOI: 10.1109/ATIT49449.2019.9030472
11. Korniyenko B.Y., Ladieva L.R., Galata L.P. Mathematical model of heat transfer process of production of granulated fertilizers in fluidized bed. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2021. № 16 (20). P. 2126-2131.
12. Корнієнко Б.Я. Інформаційні технології оптимального управління виробництвом мінеральних добрив. Київ. 2014. 288 с.
13. Korniyenko B.Y. The two phase model of formation of mineral fertilizers in the fluidized-bed granulator. *The Advanced Science Journal*. 2013. № 4. P. 41-44.
14. Корнієнко Б.Я. Двохфазна модель процесу зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі. Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». 2012. № 2(10). С. 31-35.
15. Корнієнко Б.Я. Математичне моделювання динаміки процесів переносу при зневодненні та гранулюванні у псевдозрідженому шарі. Науковий журнал «Вісник Національного авіаційного університету». 2012. № 4(53). С. 84-90.
16. Korniyenko B.Y. Modeling of transport processes in disperse systems. *The Advanced Science Journal*. 2013. № 1. P. 7-10.
17. Корнієнко Б.Я. Мінеральні добрива. Двохфазна модель утворення в грануляторі із псевдозрідженим шаром. *Хімічна промисловість України*. 2013. № 1. С. 39-43.
18. Корнієнко Б.Я., Ладієва Л.Р., Снігур О.В. Гранулювання у псевдозрідженому шарі. Дослідження детермінованого хаосу процесу. *Хімічна промисловість України*. 2013. № 2. С. 20-23.
19. Korniyenko B.Y. Research modes of a fluidized bed granulator. *The Advanced Science Journal*. 2013. № 5. P. 12-15.
20. Корнієнко Б.Я. Ідентифікація процесу гранулювання мінеральних добрив у апараті з псевдозрідженим шаром. *Наукоємні технології*. 2013. № 3(19). С. 280-284.

21. Korniyenko B.Y., Osipa L. Identification of the granulation process in the fluidized bed. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2018. № 13(14). P. 4365-4370.
22. Korniyenko B., Ladieva L. Mathematical Modeling Dynamics of the Process Dehydration and Granulation in the Fluidized Bed. Advances in Intelligent Systems and Computing. 1247 AISC. 2021. P. 18-30.
23. Korniyenko B., Ladieva L., Galata L. Control system for the production of mineral fertilizers in a granulator with a fluidized bed. 2020 2nd IEEE International Conference on Advanced Trends in Information Theory. 2020. № 9349344. P. 307-310.
24. Korniyenko B.Y., Borzenkova S.V., Ladieva L.R. Research of three-phase mathematical model of dehydration and granulation process in the fluidized bed. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2019. № 14(12). P. 2329-2332.
25. Korniyenko B.Y., Ladieva L.R. Mathematical modeling dynamics of the process dehydration and granulation in the fluidized bed. Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту. Херсон. 2019. P. 86-88.
26. Корнієнко Б.Я. Мінеральні добрива. Оптимізація процесу зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі. Хімічна промисловість України. 2013. № 4. С. 69-73.
27. Korniyenko B.Y. Static and dynamic characteristics of transport processes in disperse systems. Наукоємні технології. 2013. № 2(18). P. 166-170.
28. Корнієнко Б.Я. Мінеральні добрива. Статична оптимізація процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі. Хімічна промисловість України. 2013. № 5. С. 36-40.
29. Корнієнко Б.Я. Ідентифікація процесу гранулювання мінеральних добрив у апараті з псевдозрідженим шаром. Наукоємні технології. 2013. № 3(19). С. 280-284.
30. Корнієнко Б.Я. Задачі оптимізації зневоднення та гранулювання мінеральних добрив у псевдозрідженому шарі. Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». 2014. № 1(12). С. 28-31.
31. Kornienko Y.M., Liubeka A.M., Sachok R.V., Korniyenko B.Y. Modeling of heat exchangement in fluidized bed with mechanical liquid distribution. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2019. № 14(12). P. 2203-2210.
32. Korniyenko B., Galata L., Ladieva L. Security Estimation of the Simulation Polygon for the Protection of Critical Information Resources. CEUR Workshop Proceedings, Selected Papers of the XVIII International Scientific and Practical Conference "Information Technologies and Security" (ITS 2018). Kyiv. Ukraine. 2018. № 2318. P. 176-187.
33. Корнієнко Б.Я. Дослідження моделі взаємодії відкритих систем з погляду інформаційної безпеки. Наукоємні технології. 2012. № 3(15). С. 83-89.
34. Korniyenko B., Yudin O., Novizkiy E. Open systems interconnection model investigation from the viewpoint of information security. The Advanced Science Journal. 2013. № 8. P. 53-56.
35. Zhulynskyi A.A., Ladieva L.R., Korniyenko B.Y. Parametric identification of the process of contact membrane distillation. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences Volume 14. 2019. № 17. P. 3108-3112.
36. Bieliatynskyi A., Osipa L., Kornienko B. Water-saving processes control of an airport. Paper presented at the MATEC Web of Conferences. 2018. № 239.
37. Korniyenko B., Zabolotnyi V., Galata L. The Optimization of the Critical Resource Protection System of a Mineral Fertilizers Manufacturing Facility. Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications, IDAACS 2021. 2021. № 1. P. 172-178.
38. Babak V.P., Babak S.V., Myslovych M.V., Zaporozhets A.O., Zvaritch V.M. Methods and models for information data analysis. Studies in Systems, Decision and Control. 2021. № 281. P. 23-70. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-44443-3_2
39. Mikhail Polishchuk, Mikhail Tkach, Igor Parkhomey, Juliy Boiko, Oleksander Eromenko. Experimental Studies on the Reactive Thrust of the Mobile Robot of Arbitrary Orientation. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Informatics. 2020. № 8(2). P. 340-352.
40. Kandra Deka. Modeling of Air Temperature using ANFIS by Wavelet Refined Parameters. International Journal of Intelligent Systems and Applications (IJISA). 2016. № 8(1). P.25-34. DOI: 10.5815/ijisa.2016.01.04
41. Javad Ghiasi-Freeez, Amir Hatampour, Payam Parvasi. Application of Optimized Neural Network Models for Prediction of Nuclear Magnetic Resonance Parameters in Carbonate Reservoir Rocks. International Journal of Intelligent Systems and Applications (IJISA). 2015. №.7(6). P. 21-32. DOI: 10.5815/ijisa.2015.06.02
42. Milad Malekzadeh, Alireza Khosravi, Abolfazl Ranjbar Noei, Reza Ghaderi. Application of Adaptive Neural Network Observer in Chaotic Systems. International Journal of Intelligent Systems and Applications (IJISA). 2014. № 6(2). P. 37-43. DOI: 10.5815/ijisa.2014.02.05

References:

1. Adetayo, A.A., et al. (1995). Population balance modelling of drum granulation of materials with wide size distribution. *Powder Technology*. 82(1). 37-49.
2. Vreman, A.W., C.E. van Lare, and M.J. Hounslow (2009). A basic population balance model for fluid bed spray granulation. *Chemical Engineering Science*. 64(21). 4389-4398.
3. M. Syamlal, W. Rogers, and O. Brien T. J. (1993). MFI Documentation: Volume1, Theory Guide. *National Technical Information Service*. Springfield. VA. DOE/METC9411004, NTIS/DE94000871993.
4. Gidaspow D., R.B. and J.D. (1992). Hydrodynamics of Circulating Fluidized Beds, Kinetic Theory Approach. In *Fluidization VII. Proceeding of the 7th Engineering Foundation Conference on Fluidization*. 75-82.
5. Lun, C.K.K., et al. (1984). Kinetic Theories for Granular Flow: Inelastic Particles in Couette Flow and Slightly Inelastic Particles in a General Flow Field. *Journal of Fluid Mechanics*. 140. 223-256.

6. Kornienko Y.M., Haidai S.S., Sachok R.V., Liubeka A.M., Korniyenko B.Y. (2020). Increasing of the heat and mass transfer processes efficiency with the application of non-uniform fluidization. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 15(7). 890-900.
7. Korniyenko B., Galata L., Ladieva L. (2019). Mathematical model of threats resistance in the critical information resources protection system. *Paper presented at the CEUR Workshop Proceedings*. 2577. 281-291.
8. Korniyenko B., Kornienko Y., Haidai S., Liubeka A., Hulienko S. Conditions of Non-uniform Fluidization in an Auto-oscillating Mode. *Advances in Computer Science for Engineering and Manufacturing. ISEM 2021. Lecture Notes in Networks and Systems*. 463. 14-27.
9. Korniyenko B., Kornienko Y., Haidai S., Liubeka A. The Heat Exchange in the Process of Granulation with Non-uniform Fluidization. *Advances in Computer Science for Engineering and Manufacturing. ISEM 2021. Lecture Notes in Networks and Systems*. 463. 28-37.
10. Korniyenko B., Galata L., Ladieva L. Research of Information Protection System of Corporate Network Based on GNS3. *2019 IEEE International Conference on Advanced Trends in Information Theory, ATIT 2019 – Proceedings*. 9030472. 244-248. DOI: 10.1109/ATIT49449.2019.9030472
11. Korniyenko B.Y., Ladieva L.R., Galata L.P. Mathematical model of heat transfer process of production of granulated fertilizers in fluidized bed. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 16 (20). 2126-2131.
12. Korniyenko B.Y. (2014). Informatsiini tekhnologii optimalnogo upravlinnia vyrobnytstvom mineralnykh dobryv [Information technologies for optimal management of mineral fertilizer production], 288.
13. Korniyenko B.Y. (2013). The two phase model of formation of mineral fertilizers in the fluidized-bed granulator. *The Advanced Science Journal*, 4, 41-44.
14. Korniyenko B.Y. (2012). Dvokhfazna model protsesu znevodnennia ta hranuliuvannia u psevdoridzhenomu shari [Two-phase model of the process of dehydration and granulation in a fluidized bed]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy «Kyivskiy politekhnichnyi instytut», Seriya «Khimichna inzheneriia, ekolohiia ta resursozberezhennia»*, 2(10), 31-35.
15. Korniyenko B.Y. (2012). Matematychni modeliuvannia dynamiky protsesiv perenosu pry znevodnenni ta hranuliuvanni u psevdoridzhenomu shari [Mathematical modeling of the dynamics of transfer processes during dehydration and granulation in a fluidized bed]. *Naukovyi zhurnal «Visnyk Natsionalnoho aviatorsinoho universytetu»*, 4(53), 84-90.
16. Korniyenko B.Y. (2013). Modeling of transport processes in disperse systems. *The Advanced Science Journal*, 1. 7-10.
17. Korniyenko B.Y. (2013). Mineralni dobryva. Dvokhfazna model utvorennia v hranulatori iz psevdoridzhenym sharom [Mineral fertilizers. Two-phase model of formation in a fluidized bed granulator]. *Khimichna promyslovist Ukrainy*, 1, 39-43.
18. Korniyenko B.Y., Ladieva L.R., Snihur O.V. (2013). Hranuliuvannia u psevdoridzhenomu shari. Doslidzhennia determinovanoho khaosu protsesu [Granulation in a fluidized bed. Study of deterministic process chaos]. *Khimichna promyslovist Ukrainy*, 2, 20-23.
19. Korniyenko B.Y. (2013). Research modes of a fluidized bed granulator. *The Advanced Science Journal*, 5, 12-15.
20. Korniyenko B.Y. (2013). Identyfikatsiia protsesu hranuliuvannia mineralnykh dobryv u aparati z psevdoridzhenym sharom [Identification of the granulation process of mineral fertilizers in a fluidized bed apparatus]. *Naukoiemni tekhnologii*, 3(19), 280-284.
21. Korniyenko B.Y., Osipa L. (2018). Identification of the granulation process in the fluidized bed. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 13(14), 4365-4370.
22. Korniyenko B., Ladieva L. (2021). Mathematical Modeling Dynamics of the Process Dehydration and Granulation in the Fluidized Bed. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 1247 AISC, 18-30.
23. Korniyenko B., Ladieva L., Galata L. (2020). Control system for the production of mineral fertilizers in a granulator with a fluidized bed. *2020 2nd IEEE International Conference on Advanced Trends in Information Theory*, 9349344, 307-310.
24. Korniyenko B.Y., Borzenkova S.V., Ladieva L.R. (2019). Research of three-phase mathematical model of dehydration and granulation process in the fluidized bed. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 14(12), 2329-2332.
25. Korniyenko B.Y., Ladieva L.R. (2019). Mathematical modeling dynamics of the process dehydration and granulation in the fluidized bed. *Intelektualni systemy pryiniattia rishen i problemy obchysluvalnoho intelektu*, 86-88.
26. Korniyenko B.Y. (2013). Mineralni dobryva. Optymizatsiia protsesu znevodnennia ta hranuliuvannia u psevdoridzhenomu shari [Mineral fertilizers. Optimization of the process of dehydration and granulation in a fluidized bed]. *Khimichna promyslovist Ukrainy*, 4, 69-73.
27. Korniyenko B.Y. (2013). Static and dynamic characteristics of transport processes in disperse systems. *Naukoiemni tekhnologii*, 2(18), 166-170.
28. Korniyenko B.Y. (2013). Mineralni dobryva. Statychna optymizatsiia protsesu hranuliuvannia u psevdoridzhenomu shari [Mineral fertilizers. Static optimization of the granulation process in a fluidized bed]. *Khimichna promyslovist Ukrainy*, 5, 36-40.
29. Korniyenko B.Y. (2013). Identyfikatsiia protsesu hranuliuvannia mineralnykh dobryv u aparati z psevdoridzhenym sharom [Identification of the granulation process of mineral fertilizers in a fluidized bed apparatus]. *Naukoiemni tekhnologii*, 3(19), 280-284.
30. Korniyenko B.Y. (2013). Zadachi optymizatsii znevodnennia ta hranuliuvannia mineralnykh dobryv u psevdoridzhenomu shari [Problems of optimization of dehydration and granulation of mineral fertilizers in a fluidized bed]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy «Kyivskiy politekhnichnyi instytut», Seriya «Khimichna inzheneriia, ekolohiia ta resursozberezhennia»*, 1(12), 28-31.

31. Kornienko Y.M., Liubeka A.M., Sachok R.V., Korniyenko B.Y. (2019). Modeling of heat exchangement in fluidized bed with mechanical liquid distribution. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 14(12), 2203-2210.
32. Korniyenko B., Galata L., Ladiava L. (2018). Security Estimation of the Simulation Polygon for the Protection of Critical Information Resources. *CEUR Workshop Proceedings, Selected Papers of the XVIII International Scientific and Practical Conference "Information Technologies and Security" (ITS 2018)*, 2318, 176-187.
33. Korniyenko B.Y. (2012). Doslidzhennia modeli vzaiemodii vidkrytykh system z pohliadu informatsiinoi bezpeky [Study of the interaction model of open systems from the point of view of information security]. *Naukoiemni tekhnolohii*, 3 (15), 83-89.
34. Korniyenko B., Yudin O., Novizkij E. (2013). Open systems interconnection model investigation from the viewpoint of information security. *The Advanced Science Journal*, 8. 53-56.
35. Zhulynskyi A.A., Ladiava L.R., Korniyenko B.Y. (2019). Parametric identification of the process of contact membrane distillation. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences Volume 14*, 17, 3108-3112.
36. Bieliatynskyi, A., Osipa, L., Kornienko, B. (2018). Water-saving processes control of an airport. *Paper presented at the MATEC Web of Conferences*, 239.
37. Korniyenko B., Zabolotnyi V., Galata L. The Optimization of the Critical Resource Protection System of a Mineral Fertilizers Manufacturing Facility. *Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications, IDAACS 2021*. 1. 172-178.
38. Babak V.P., Babak S.V., Myslovych M.V., Zaporozhets A.O., Zvaritch V.M. (2021). Methods and models for information data analysis. *Studies in Systems, Decision and Control*. 281. 23-70. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44443-3_2
39. Mikhail Polishchuk, Mikhail Tkach, Igor Parkhomey, Juliy Boiko, Oleksander Eromenko. Experimental Studies on the Reactive Thrust of the Mobile Robot of Arbitrary Orientation. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Informatics*. 8(2). 340-352.
40. Kandra Deka,(2016). Modeling of Air Temperature using ANFIS by Wavelet Refined Parameters. *International Journal of Intelligent Systems and Applications (IJISA)*. 8(1). 25-34. DOI: 10.5815/ijisa.2016.01.04
41. Javad Ghiasi-Freez, Amir Hatampour, Payam Parvasi (2015). Application of Optimized Neural Network Models for Prediction of Nuclear Magnetic Resonance Parameters in Carbonate Reservoir Rocks. *International Journal of Intelligent Systems and Applications (IJISA)*. 7(6). 21-32. DOI: 10.5815/ijisa.2015.06.02
42. Milad Malekzadeh, Alireza Khosravi, Abolfazl Ranjbar Noei, Reza Ghaderi (2014). Application of Adaptive Neural Network Observer in Chaotic Systems. *International Journal of Intelligent Systems and Applications (IJISA)*. 6(2). 37-43. DOI: 10.5815/ijisa.2014.02.05

УДК 521.9:004.932

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.2.7>

Євген РЕХЛЕЦЬКИЙ

доцент кафедри комп'ютерних наук, Львівський торговельно-економічний університет, вул. Туган-Барановського, 10, Львів, Україна, індекс 79005 (rekhltskyuevgen@gmail.com)

ORCID: 0000-0002-8879-4161

Ірина АРТИЩУК

кандидат економічних наук, доцент кафедри систем автоматизованого проектування, Національний університет «Львівська політехніка», вул. Митрополита Андрія, 5, 4-й н.к., Львів, Україна, індекс 79000, доцент кафедри комп'ютерних наук, Львівський торговельно-економічний університет, вул. Туган-Барановського, 10, Львів, Україна, індекс 79005 (irusia-13@ukr.net)

ORCID: 0000-0001-7287-8451

Марія КРУТЯК

старший викладач кафедри комп'ютерних наук, Львівський торговельно-економічний університет, вул. Туган-Барановського, 10, Львів, Україна, індекс 79005 (kmb55@lute.lviv.ua)

ORCID: 0009-0000-8544-8733

Леся ХМІЛЯРЧУК

старший викладач кафедри комп'ютерних наук, Львівський торговельно-економічний університет, вул. Туган-Барановського, 10, Львів, Україна, індекс 79005 (_lkh@ukr.net)

ORCID: 0000-0002-1753-6472

Yevhen REHLETSKY

Associate Professor of the Department of Computer Sciences, Lviv University of Trade and Economics, 10 Tugan-Baranovskoho str., Lviv, Ukraine, postal code 79005 (rekhltskyuevgen@gmail.com)

Iryna ARTYSHCHUK

Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of the Department of Computer-Aided Design, Lviv Polytechnic National University, 5 Mytropolyta Andreia str., Building 4, Lviv, Ukraine, postal code 79000; Associate Professor of the Department of Computer Sciences, Lviv University of Trade and Economics, 10 Tugan-Baranovsky str, Lviv, Ukraine, postal code 79005 (irusia-13@ukr.net)

Maria KRUTYAK

senior lecturer of the Department of Computer Sciences, Lviv University of Trade and Economics, 10 Tugan-Baranovskoho str., Lviv, Ukraine, postal code 79005 (kmb55@lute.lviv.ua)

Lesya KHMILYARCHUK

senior lecturer of the Department of Computer Sciences, Lviv University of Trade and Economics, 10 Tugan-Baranovskoho str., Lviv, Ukraine, postal code 79005 (_lkh@ukr.net)

Бібліографічний опис статті: Рехлецький, Є., Артищук, І., Крутяк, М., Хмілярчук, Л. Удосконалення алгоритму обробки астрономічних зображень за допомогою методу Lucky Imaging. *Інформаційні технології та суспільство*. 2023. Вип. 2(8). 62–68. DOI: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.2.7>

Bibliographic description of the article: Rekhletsy, E., Artyshchuk, I., Krutyak, M., Khmilyarchuk, L. (2023). Udoskonalennia alhorytmu obrobky astronomichnykh zobrazhen za dopomohoiu metodu Lucky Imaging [Improvement of the astronomical image processing algorithm using the Lucky Imaging method]. *Informatsiini tekhnolohii ta suspilstvo – Information technology and society*, 2(8), 62–68. DOI: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.2.7>

УДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМУ ОБРОБКИ АСТРОНОМІЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДУ LUCKY IMAGING

Lucky Imaging – це один із методів боротьби з впливом атмосфери, що базується на принципах спекл-інтерферометрії. Його суть полягає в тому, що, оскільки процес атмосферної турбулентції є стохастичним, то з серії отриманих зображень деякі фотографії будуть кращої якості, ніж інші, тобто міститимуть інформацію на рівні дифракційного обмеження. Тільки найкращі зображення відбирають, співставляють та усереднюють, що дає як результат зображення астрономічного об'єкта зі значно покращеною кутовою роздільною здатністю [1; 3; 4; 10].

Основним недоліком класичного методу Lucky Imaging є те, що в ньому для усереднення обираються лише цілі зображення достатньої якості, шанс отримання яких падає зі зростанням вхідної апертури телескопа. Також цей метод ніяк не бореться зі характерними спотвореннями, викликаними атмосферною турбуленцією, яка суттєво впливає на якість отриманого зображення, особливо для астрономічних об'єктів з великим кутовим розміром, як Сонце чи Місяць.

На основі методик Lucky Imaging та Avistack розроблено удосконалений алгоритм обробки астрономічних зображень. З його використанням статистичні методи обробки астрономічних зображень дозволяють на відносно дешевому обладнанні отримувати зображення астрономічних об'єктів, які за якістю та інформативністю не поступаються зображенням, отриманим на великих та дорогих телескопах з використанням адаптивної оптики чи інших методів боротьби з явищем атмосферної турбуленції. Таким чином, навіть астрономи-любители отримують інструмент, який дозволяє їм займатися спостереженнями на рівні з найбільшими обсерваторіями світу.

У статті описано удосконалення алгоритму обробки астрономічних зображень, яке враховує особливості атмосферної турбуленції та коригує спотворення, викликані ними. Сам алгоритм є доволі універсальним і підходить не лише для астрономічних зображень, але у цій статті показано роботу з зображеннями Сонця, отриманими на Астрономічній Обсерваторії ЛНУ імені Івана Франка.

Реалізація алгоритму здійснена мовою програмування Python з використанням бібліотеки OpenCV (англ. Open Source Computer Vision Library).

Ключові слова: Lucky Imaging, атмосфера, турбулентність, хвильовий фронт, роздільна здатність, дифракційна межа, FWHM, best match, поле деформацій, фільтр Гауса, OpenCV, Python.

IMPROVING THE ASTRONOMICAL IMAGES PROCESSING ALGORITHM USING LUCKY IMAGING

Lucky Imaging is one of the methods of combating atmospheric effects based on the principles of speckle interferometry. Its essence is that, since the process of atmospheric turbulence is stochastic, from the series of images obtained, some photos will be of better quality than others, that is, they will contain information at the level of the diffraction limit. Only the best images are selected, matched and averaged, resulting in an image of an astronomical object with significantly improved angular resolution [1; 3; 4; 10].

The main drawback of the classic Lucky Imaging method is that it selects only whole images of sufficient quality for averaging, the chance of obtaining which decreases with the increase of the aperture of the telescope. Also, this method does not combat the characteristic distortions caused by atmospheric turbulence, which significantly affects the quality of the obtained image, especially for astronomical objects with a large angular size, such as the Sun or the Moon.

An improved algorithm for processing astronomical images has been developed on the basis of Lucky Imaging techniques. With its use, statistical methods of astronomical image processing make it possible to obtain images of astronomical objects on relatively cheap equipment, which in terms of quality and informativeness are not inferior to images obtained on large and expensive telescopes using adaptive optics or other methods of combating the phenomenon of atmospheric turbulence. Thus, even amateur astronomers get a tool that allows them to make observations on a par with the world's largest observatories.

The article describes an improved algorithm for processing astronomical images, which takes into account the peculiarities of atmospheric turbulence and corrects the distortions caused by them. The algorithm itself is quite universal and suitable not only for astronomical images, but this article shows the work with images of the Sun obtained at the Astronomical Observatory of the Ivan Franko National University.

The algorithm was implemented in the Python programming language using the OpenCV library (Open Source Computer Vision Library).

Key words: Lucky Imaging, atmosphere, turbulence, wavefront, aperture, resolution, diffraction limit, FWHM, best match, deformation field, Gaussian filter, OpenCV, Python.

Постановка проблеми. Роздільна здатність наземних телескопів є суттєво обмеженою внаслідок впливу атмосферної турбуленції. Земна атмосфера не є однорідним середовищем, тому, внаслідок турбулентного змішування шарів повітря, які мають різну температуру, з'являються зони теплішого чи холоднішого повітря розмірами до одиниць метрів. Ця температурна неоднорідність викликає відповідні зміни коефіцієнту заломлення повітря. Плоский світловий фронт, проходячи через ці неоднорідності, неминує спотворюється.

Нерегулярні спотворення хвильового фронту призводять до випадкових зміщень, розмиття та хаотичних змін яскравості зображення. Окрім турбулентного спотворення та молекулярного розсіяння, світло в атмосфері ще розсіюється на аерозолях – дрібних частках пилу, сажі, води. Це викликає появу ореолів навколо астрономічних об'єктів на отриманому зображенні.

Lucky Imaging – це один з методів боротьби з впливом атмосфери, що базується на принципах спекл-інтерферометрії. Його суть полягає в тому, що, оскільки процес атмосферної турбуленції є стохастичним, то з серії отриманих зображень деякі фотографії будуть кращої якості, ніж інші, тобто міститимуть інформацію на рівні дифракційного обмеження. Тільки найкращі зображення відбирають, співставляють та усереднюють, що дає в результаті зображення астрономічного об'єкта зі значно покращеною кутовою роздільною здатністю [2].

Аналіз досліджень і публікацій. Основним недоліком класичного методу Lucky Imaging є те, що в ньому для усереднення обираються лише цілі зображення достатньої якості, шанс отримання яких падає зі зростанням вхідної апертури телескопа [1; 4]. Також, цей метод ніяк не бореться з характер-

ними спотвореннями, викликаними атмосферною турбуленцією, яка суттєво впливає на якість отриманого зображення, особливо для астрономічних об'єктів з великим кутовим розміром, як Сонце чи Місяць [7; 8; 9].

Зважаючи на ці недоліки, з'явилася потреба розробити алгоритм обробки серій короткоекспозиційних астрономічних зображень на основі методики Lucky Imaging, який би міг обирати для усереднення не цілі зображення, а його ділянки з найкращою якістю. Також, алгоритм повинен боротися з деформаціями, спричиненими впливом атмосферної турбуленції.

Для досягнення поставлених цілей необхідно виконати такі основні кроки:

- Побудувати векторне поле деформацій для кожного зображення з серії відносно еталонного зображення.
- Застосувати зворотню деформацію до всіх зображень згідно знайденого для них поля деформацій, приводячи кожне таке зображення до еталонного.
- Зробити оцінку якості кожної ділянки на всіх зображеннях та провести рангування за цим критерієм.
- Провести усереднення тих ділянок зображень, які відповідають вхідному критерію (наприклад, 10 % найкращих ділянок).

Як вхідні дані обрано серію астрономічних фотографій Сонця, знятих на Астрономічній Обсерваторії ЛНУ імені Івана Франка.

Виклад основного матеріалу. Дані з дослідницької камери отримуються в форматі RAW. В першу чергу ці зображення конвертуються в формат TIFF за допомогою утиліти RAW2TIFF з коефіцієнтом гамма рівним 1. У наборі зображень також містяться так звані *флетфілди* (англ. Flat – плоске, field – поле) – це зображення, зняті з розсіювачем на об'єктиві. Вони дозволяють отримати інформацію про неоднорідності матриці, оптики, їх забруднення пилом і т.ін. Програма автоматично визначає, які із зображень є флетфілдами і усереднює їх для отримання основного *мастер-флетфілду*. В подальшому всі отримані зображення Сонця коректуються за допомогою мастер-флетфілда для того, щоб прибрати неоднорідності матриці та оптики. Далі з зображень в нашому випадку виділяється зелений канал. Це робиться тому, що в матрицях цифрових камер (не астрономічних) зелених світлочутливих елементів вдвічі більше, ніж червоних та синіх. Причиною цього є те, що людський зір найчутливіший до зеленої частини спектру. Таким чином, цифрові камери краще передають нюанси освітленості в цій області спектру. В професійних астрономічних камерах використовуються матриці, які реєструють лише інтенсивність, а фільтрація вхідного світла виконується необхідним фільтром. Отримані зображення центруються по диску Сонця, і обрізаються по краях сонячного диску з деяким запасом.

Серед підготовлених зображень проводиться початкове відсіювання за середньою яскравістю. Це дозволяє зразу усунути зображення, затемнені хмарністю. Серед зображень, що залишилися, проводиться рангування за якістю (чіткістю деталей) і найкраще зображення вибирається як еталонне.

Вхідні зображення обробляються фільтром Гауса для того, щоб зменшити рівень шуму. За своїм характером зображення поверхні Сонця є достатньо малокоонтрастним та шумоподібним, тому шуми, які виникають на матриці цифрової камери, вносять суттєві похибки в роботу алгоритму на етапі пошуку карти деформацій. Фільтрація фільтром Гауса експериментально показала суттєве покращення результатів.

Зауважимо, що зображення фільтруються лише для етапу пошуку поля деформацій поточного зображення відносно еталонного. Оригінальні зображення не змінюються, інакше розмиття цим фільтром призвело б до суттєвого погіршення якості результату.

Для оцінки якості роботи алгоритму поле деформацій було візуалізовано. Модуль вектора зміщення відображався у вигляді інтенсивності, а напрямок – кольором. Для полегшення сприйняття візуалізація напрямку та модуля відбувалася на двох окремих зображеннях.

Як вхідні параметри на етапі розрахунку векторного поля деформацій використовуються максимальний радіус пошуку, зона розрахунку *best match* (англ. – найкраще співпадіння) та крок сітки.

На еталонному зображенні обирається ділянка, розмір якої заданий параметром зони розрахунку *best match*. Центр цієї зони знаходиться на вузлі сітки пошуку. На відповідному вузлі сітки на поточному зображенні (те, для якого ми шукаємо вектори зміщення) розраховується коефіцієнт співпадіння (*best match*) з еталонною ділянкою для кожного пікселя в межах радіусу пошуку. Серед отриманих значень коефіцієнта співпадіння нам потрібно обрати максимальне. Позиція глобального максимуму відносно поточного вузла сітки, теоретично, і буде вектором зміщення ділянки поточного зображення відносно еталонного. На практиці ж, через шумоподібний характер зображення, матриця значень містить дуже багато паразитних локальних максимумів. Також трапляється, що паразитний максимум є глобальним. Проте це трапляється відносно рідко, а, оскільки, алгоритм статистичний і обробляє велику кількість

зображень, то ці похибки суттєво згладжуються. З цими ефектами допомагає боротися попередня та подальша фільтрація цих зображень та отриманих векторів фільтром Гауса, що була зазначена раніше.

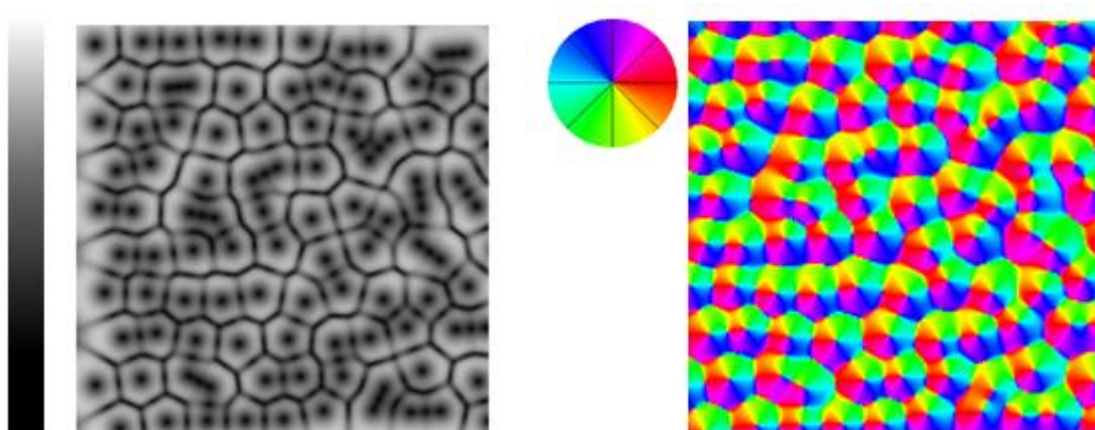


Рис. 1. Візуалізація модуля вектора зміщень (зліва) та напрямку (справа)

Розмір зони розрахунку кореляції береться порядку розміру проєкції області ізопланатизму на матрицю камери. Найкращі результати були отримані для зони 3×3 пікселів, що співпадає з теоретично розрахованими значеннями. Радіус пошуку був обраний величиною $2 \times \text{FWHM}$ (Full width at half maximum) атмосферної ФРТ (функції розсіювання точки). Це було зроблено з розрахунку на те, що, через характер форми атмосферної ФРТ, в цей радіус потрапляє порядка 90 % енергії. Таким чином, ми забезпечуємо себе від попадання на паразитні максимуми сусідніх зон, разом з тим втрачаючи статистично незначну кількість реальних. Для наших умов FWHM атмосферної ФРТ складає близько 3-4 пікселів, отже радіус пошуку був обраний величиною 4 пікселів.

Оскільки величина зміщень спричинених турбуленцією на зображеннях є розміром порядка кількох пікселів, то для отримання хорошого результату потрібна субпіксельна точність. Хороший результат дає простий пошук центру ваги для матриці пікселів розміром 3×3 , центр якої знаходиться за координатами нашого вектора. Уточнені значення векторів зміщення записуються покомпонентно в 2 масиви у вигляді $vecX(i, j)$, $vecY(i, j)$.

З огляду на те, що характер зображень є достатньо шумоподібним, то й результат пошуку векторів зміщень містить компоненту шуму. Для того, щоб згладити отримані значення векторів, вони фільтруються покомпонентно медіанним та Гаусовим фільтрами. Після цього вектори домножуються на певний поправочний коефіцієнт для врахування апертурності розрахунку best match та остаточних фільтрів. Сам коефіцієнт був вирахований експериментально і його значення є предметом подальших досліджень.

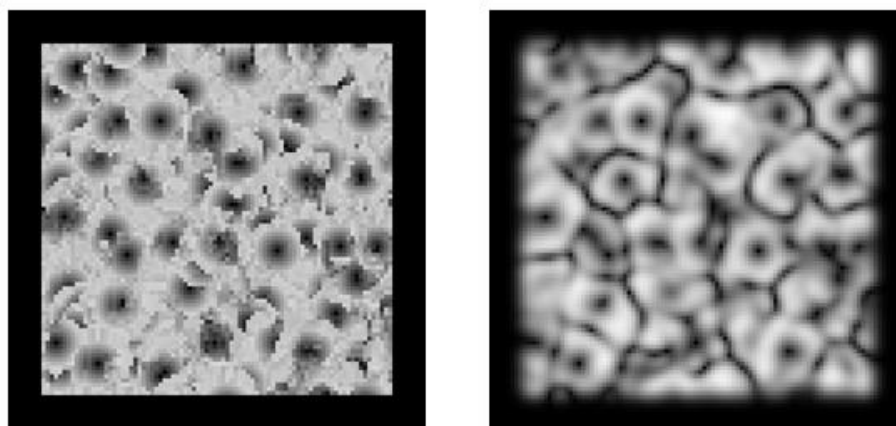


Рис. 2. Зліва зображена візуалізація модуля поля векторів без згладжування. Справа – модуль поля векторів згладжених покомпонентно. Результат отриманий на реальних зображеннях Сонця. Можна побачити характерну форму «бульбашок» атмосферної турбуленції

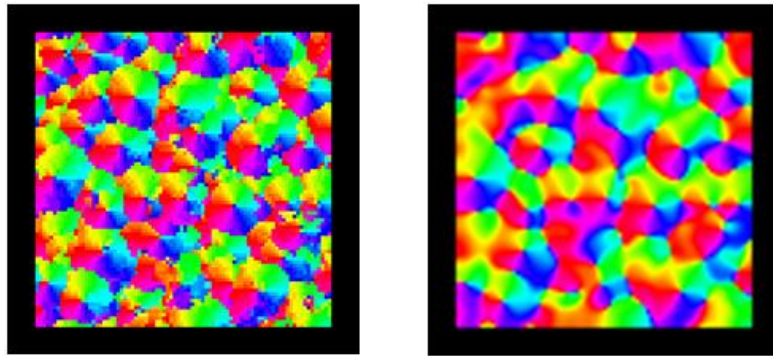


Рис. 3. Напрямки векторів зміщення для незгладжених (зліва) та згладжених векторів (справа)

Після того, як знайдено поля векторів деформацій для кожного зображення з набору, знаходимо поле *residual* – поле залишкових деформацій. Для цього знаходимо середній вектор для кожного вузла сітки по всіх зображеннях з набору. Це поле буде використане під час остаточної зворотної деформації результатів.

Для знаходження коефіцієнту співпадіння ділянок зображень було апробовано декілька методів оцінки *best match*. Більшість з них дало поганий результат.

У статті Martin J. та Crowley J.L. [5] було згадано, що для шумоподібних зображень найстабільніші результати дає метод суми квадратів різниць. В OpenCV ці методи є під назвою SQDIFF і SQDIFF_NORM. Апробація методу SQDIFF_NORM дала дуже чіткий результат на тестовому зображенні.

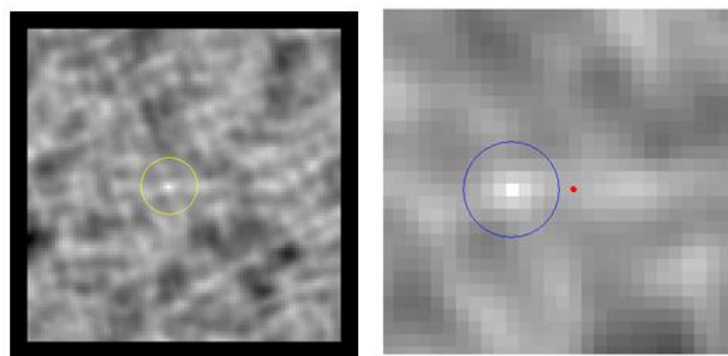


Рис. 4. Метод SQDIFF_NORMED. Чітко видно максимальне співпадіння в точці, зміщеній на 5 пікселів

Для того, щоб протестувати правильність роботи алгоритму, було створено програму, яка генерує штучні зображення, подібні за характеристиками до реальних. Програма створює два спотворених зображення з наперед порахованими векторами зміщень для того, щоб можна було порівняти результати роботи алгоритму з ними.

Результати, отримані алгоритмом, виявилися візуально дуже подібними зі згенерованими, тому роботу алгоритму пошуку поля деформацій можна вважати достатньо коректною.

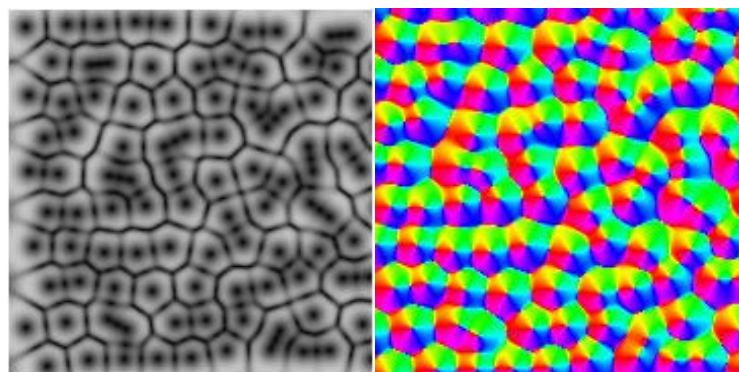


Рис. 5. Модуль та напрямки векторів зміщень еталонного зображення, згенеровані програмою

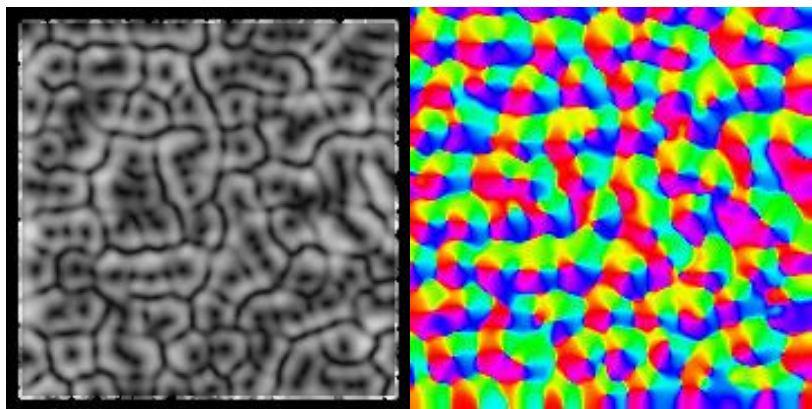


Рис. 6. Результати обробки алгоритмом еталонних зображень

Далі до кожного зображення застосовується зворотня деформація по векторному полю деформацій із застосуванням у нашому випадку білінійної інтерполяції. Таким чином, всі зображення приводяться до еталонного. Оскільки Lucky Imaging базується на виборі найкращих зображень для усереднення, то на цьому етапі відбувається оцінка якості кожної ділянки, їх рангування та визначення найкращих ділянок для подальшого усереднення. Під час усереднення обраних ділянок їхні краї згладжуються, щоб уникнути появи артефактів на границях стиків ділянок.

Останнім етапом роботи алгоритму є остаточна деформація отриманого зображення по полю residual. Оскільки еталонне зображення теж є деформованим атмосферою, то і всі зображення, приведені до нього, є все ще спотвореними. Звісно, ми не можемо знайти точне значення векторів поля деформацій для еталонного зображення, проте усереднення векторів зміщень по великому набору дозволяє отримати статистичне очікування для цих векторів. Зворотня деформація результату по полю цих векторів дозволить максимально приблизити результат до ідеального.

Для оцінки ефективності роботи алгоритму було розроблено комплекс програм, який дозволяє кожен етап його роботи опрацьовувати з різними параметрами.

Навіть на невеликому наборі вхідних даних було отримано візуально помітний результат – зображення Сонця з покращеною роздільною здатністю.

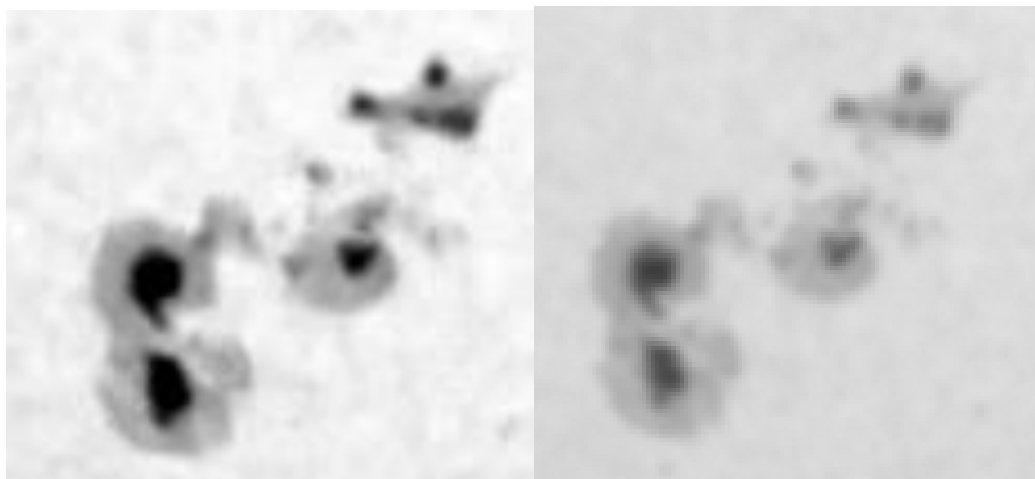


Рис. 7. Зліва – результат роботи алгоритму, справа – просте усереднення набору

Висновки. Як підсумок, розроблено покращений алгоритм Lucky Imaging, який дозволяє суттєво збільшити ефективність такого підходу до обробки астрономічних зображень.

Прототип алгоритму продемонстрував дієздатність, тому доцільною є його подальша розробка. Наступним кроком може бути автоматизація та оптимізація параметрів обробки алгоритму, оскільки вони залежать від стану атмосфери в період проведення зйомки, характеристик об'єкта спостережень та ін. Також суттєвим завданням є оптимізація алгоритму для пришвидшення його роботи.

Автори висловлюють свою вдячність Підстригачу І. Я., завідувачу відділення обслуговування телескопів Астрономічної Обсерваторії ЛНУ імені Івана Франка, за надані вичерпні консультації та серію реальних зображень Сонця для тестування роботи алгоритму.

Список використаних джерел:

1. Brandner W., Hormuth F. Lucky Imaging in Astronomy. *Astrophysics and Space Science Library, Germany*. 2016. P. 1-16.
2. Guyon O. Extreme Adaptive Optics (Review). *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. 2018. Vol. 56, P.315-355.
3. Huang X., Li B., Wang J., Li Ju. A real-time lucky imaging algorithm based on Fourier transform and its implementation techniques. *Astronomical Society of Japan*. 2021. Vol. 73(5). P. 1240-1254.
4. Law N. M. Lucky Imaging: Diffraction-limited astronomy from the ground in the visible. *The Observatory*. 2007. Vol. 127. № 1. P. 71.
5. Martin J., Crowley J. L. Experimental Comparison of Correlation Techniques. Grenoble, France: IMAG-LIFIA, 2007. 9 p.
6. Oscoz A., Rebolo R., Lopez R., et al. FastCam: a new lucky imaging instrument for medium-sized telescopes. *Proc. SPIE*. 2008. Vol. 7014. P. 701447.
7. Tubbs R. N. Lucky Exposures: Diffraction Limited Astronomical Imaging Through the Atmosphere : Dissertation submitted in candidature for the degree of Doctor of Philosophy in the University of Cambridge : St. Johns College Cambridge University, 2003. 183 p.
8. Wang P., Sang X., Yu X., et al. A full-parallax tabletop three dimensional light-field display with high viewpoint density and large viewing angle based on space-multiplexed voxel screen. *Optics Communications*. 2021. Vol.488.
9. Willey E.O. A Pixel Correlation Technique for Smaller Telescopes to Measure Doubles. *Journal of Double Star Observations*. 2013. Vol. 9. № 2. P. 142-152.
10. Wu X., Yan J., Wu K., Huang Ya. Integral lucky imaging technique for three-dimensional visualization of objects through turbulence. *Optics & Laser Technology*. 2020. Vol.125.

References:

1. Brandner W., Hormuth F. (2016). Lucky Imaging in Astronomy. *Astrophysics and Space Science Library, Germany*. 1-16.
2. Guyon O. (2018). Extreme Adaptive Optics (Review). *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 56, 315-355.
3. Huang X., Li B., Wang J., Li Ju. (2021). A real-time lucky imaging algorithm based on Fourier transform and its implementation techniques. *Astronomical Society of Japan* 73(5). 1240-1254.
4. Law, N. M. (2007). Lucky Imaging: Diffraction-limited astronomy from the ground in the visible. *The Observatory*, 127.1, 71.
5. Martin, J. & Crowley, J. L. (2007). Experimental Comparison of Correlation Techniques. Grenoble, France: IMAG-LIFIA.
6. Oscoz A., Rebolo R., Lopez R., et al. (2008). FastCam: a new lucky imaging instrument for medium-sized telescopes. *Proc. SPIE*, 7014, 701447.
7. Tubbs R. N. (2003). Lucky Exposures: Diffraction Limited Astronomical Imaging Through the Atmosphere. *Doctor's thesis*. St. Johns College Cambridge University.
8. Wang P., Sang X., Yu X., et al. (2021). A full-parallax tabletop three dimensional light-field display with high viewpoint density and large viewing angle based on space-multiplexed voxel screen. *Optics Communications*, 488.
9. Willey E.O. (2013). A Pixel Correlation Technique for Smaller Telescopes to Measure Doubles. *Journal of Double Star Observations*, 9.2, 142-152.
10. Wu X., Yan J., Wu K., Huang Ya. (2020). Integral lucky imaging technique for three-dimensional visualization of objects through turbulence. *Optics & Laser Technology*, 125.

УДК 004.056 (45)

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.2.8>

Антон СИСОЄНКО

аспірант кафедри інформаційної безпеки та комп'ютерної інженерії, Черкаський державний технологічний університет, бульвар Шевченко, 460, Черкаси, Україна, індекс 18006 (Ampere859@gmail.com)

ORCID: 0000-0002-6154-8411

Віра БАБЕНКО

доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформаційної безпеки та комп'ютерної інженерії, Черкаський державний технологічний університет, бул. Шевченка, 460, Черкаси, Україна, індекс 18006 (v.babenko@chdtu.edu.ua)

ORCID: 0000-0003-2039-2841

Світлана СИСОЄНКО

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційної безпеки та комп'ютерної інженерії, Черкаський державний технологічний університет, бул. Шевченка, 460, Черкаси, Україна, індекс 18006 (s.sysoienko@chdtu.edu.ua)

ORCID: 0000-0002-0009-337X

Anton SYSOIENKO

PhD student at the Department of Information Security and Computer Engineering, Cherkasy State Technological University Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, Ukraine, postal code 18006, (Ampere859@gmail.com)

Vira BABENKO

Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Computer Information Systems and Technologies, Cherkasy State Technological University Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, Ukraine, postal code 18006, (v.babenko@chdtu.edu.ua)

Svitlana SYSOIENKO

Ph.D., associate professor, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Computer Information Systems and Technologies, Cherkasy State Technological University Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, Ukraine, postal code 18006, (s.sysoienko@chdtu.edu.ua)

Бібліографічний опис статті: Сисоєнко А., Бабенко В., Сисоєнко С. Особливості реалізації та застосування методів обфускації коду (Аналітичне оглядове дослідження). *Інформаційні технології та суспільство*. 2023. Вип. 2 (8). С. 69–78. DOI: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.2.8>

Bibliographic description of the article: Sysoienko, A, Babenko, V. & Sysoienko, S. (2023). Osoblyvosti realizatsii ta zastosuvannia metodiv obfuskatsii kodu (Analitychne ohliadove doslidzhennia). [Features of the implementation and application of code obfuscation methods.(Analytical and review research)]. *Informatsiini tekhnolohii ta suspilstvo – Information technology and society*, 2 (8), 69–78. DOI: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.2.8>

**ОСОБЛИВОСТІ РЕАЛІЗАЦІЇ ТА ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ОБФУСКАЦІЇ КОДУ
(АНАЛІТИЧНЕ ОГЛЯДОВЕ ДОСЛІДЖЕННЯ)**

Стаття присвячена основним способам захисту програмного коду від дослідження, зокрема методам обфускації коду. Сучасний темп розвитку ІТ-індустрії зробив пріоритетним задачу підвищення безпеки програмної продукції, адже зниження ризику незаконного використання та поширення розробленого програмного продукту для розробників програмного забезпечення є надважливим аспектом діяльності. Проте, в зв'язку з розвитком інформаційних технологій завжди були і будуть залишатися невирішеними задачі піратства програмного забезпечення. Одним із способів полегшити цю проблему з технічної точки зору є використання методів захисту програмного забезпечення, особливо обфускації коду. Наведено неформальне та формальне визначення процесу обфускації. Проаналізовано основні цілі та задачі застосування методів обфускації як розробниками програмного забезпечення так і зловмисниками. Комп'ютерні технології суттєво розширили можливості як легальних користувачів програмного забезпечення, так і зловмисників щодо використання методів і засобів несанкціонованого доступу до програмних продуктів. Окремо це питання стосується байт-код орієнтованого програмного забезпечення, яке має ряд специфічних особливостей розробки та використання у сучасних комп'ютерних системах. Оскільки аналіз сучасних програмних продуктів показав тенденцію розвитку використання байт-код орієнтованого програмного забезпечення, то на демонстраційному прикладі показано реалізацію одного із методів обфускації для створеного Python-скрипта за

допомогою бібліотеки `pyArmor`. Показано, що обфускацію прийнято використовувати разом із іншими методами захисту. Зроблено висновок про те, що сумісне використання нових підходів та модифікацій існуючих технологій обфускаційних методів захисту програмного коду необхідно підсилювати за допомогою шифрування, що додасть ще один рівень захисту пристроїв і даних.

Ключові слова: обфускація, деобфускація, програмний код, перетворення, розробники програмної продукції.

FEATURES OF THE IMPLEMENTATION AND APPLICATION OF CODE OBFUSCATION METHODS (ANALYTICAL AND REVIEW RESEARCH)

The article is devoted to the main methods of protecting the software code from research, in particular the methods of code obfuscation. The modern pace of development of the IT industry has made the task of improving the security of software products a priority, because reducing the risk of illegal use and distribution of the developed software product is an extremely important aspect of activity for software developers. However, in connection with the development of information technologies, there have always been and will remain unsolved problems of software piracy. One way to alleviate this problem from a technical point of view is to use software security techniques, especially code obfuscation. An informal and formal definition of the obfuscation process is given. The main goals and objectives of the application of obfuscation methods by both software developers and attackers are analyzed. Computer technologies have significantly expanded the capabilities of both legal software users and criminals to use methods and means of unauthorized access to software products. Separately, this problem concerns the byte code-oriented software, which has a number of specific features of development and use in modern computer systems. Since the analysis of modern software products showed the development trend of using byte code-oriented software, the demonstration example shows the implementation of one of the obfuscation methods for the created Python script using the `pyArmor` library. It is shown that obfuscation is commonly used together with other protection methods. It was concluded that the combined use of new approaches and modifications of existing technologies of obfuscation methods of software code protection must be strengthened with the help of encryption, which will add another level of protection of devices and data.

Key words: obfuscation, deobfuscation, program code, transformation, software developers.

Актуальність проблеми. Розвиток інформатизації у суспільстві останніх років висунув на одне з перших місць проблему захисту величезної кількості інформації, що формується, оброблюється і передається в комп'ютерних системах, а також підвищення рівня безпеки програмного забезпечення щодо різних дестабілізуючих факторів. Комп'ютерні технології суттєво розширили можливості як легальних користувачів програмного забезпечення, так і зловмисників щодо використання методів і засобів несанкціонованого доступу до програмних продуктів. Окремо це питання стосується байт-код орієнтованого програмного забезпечення, яке має ряд специфічних особливостей розробки та використання у сучасних комп'ютерних системах. Аналіз сучасних програмних продуктів показав тенденцію розвитку використання байт-код орієнтованого програмного забезпечення. Це пов'язано з можливістю створення платформи-незалежного коду, а також сучасних та ефективних механізмів роботи з пам'яттю (наприклад, через використання `garbage collectors`). Завдяки архітектурі платформи-незалежного коду (а саме зберігання проміжного коду, який можна декомпілювати), байт-код орієнтоване програмне забезпечення вразливе до кібератак, що пов'язані з порушенням конфіденційності та автентичності [1].

Крім того, сучасний темп розвитку IT-індустрії зробив пріоритетним задачу підвищення безпеки програмної продукції. Адже зниження ризику незаконного використання та поширення розробленого програмного продукту для розробників програмного забезпечення є надзвичайним аспектом діяльності. Проте, в зв'язку з розвитком інформаційних технологій завжди були і будуть залишатися невирішеними задачі піратства програмного забезпечення. Одним із способів полегшити цю проблему з технічної точки зору є використання методів захисту програмного забезпечення, особливо обфускації коду.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Із швидким поширенням Інтернету речей (IoT) кінцеві точки як хости в мережі, які можуть отримати доступ до інших вузлів, а також, до яких можуть отримати доступ інші вузли в мережі, кожна кінцева точка потенційно є способом проникнення зловмисного програмного забезпечення у мережу. Обчислення на віддаленому хості, як правило, виконуються через посилення. Таким чином, виникає необхідність підвищення рівня безпеки програмного коду, коли код знаходиться на шляху до хосту призначення, оскільки саме в цей час вона є надзвичайно вразливою для підготовки або порушення цілісності (модифікації).

В умовах розподіленої роботи, коли офісні, віддалені й гібридні працівники використовують усе більше пристроїв у різних точках світу, захищати кінцеві точки стало ще складніше. Система захисту кінцевих точок включає низку процесів, служб і рішень, які забезпечують їх захист від кіберзагроз. Першим інструментом для забезпечення кінцевих точок стало традиційне програмне забезпечення для захисту від вірусів і зловмисних програм [2].

Одним із ефективних способів захисту програмних продуктів є використання обфускаційних методів захисту програмного коду. Заплутаною (obfuscated) називається програма, рекомендована OWASP (онлайн спільнотою, яка працює в галузі безпеки веб-застосунків), що на всіх припустимих для вихідної програми вхідних даних видає той же самий результат, що й оригінальна програма, але більш складна

для аналізу, розуміння й модифікації. Загрозу становить не лише нелегальне поширення програмних продуктів, а й нелегальні модифікації зі сторони хакерів. Заплутаною програма виходить у результаті застосування щодо вихідної програми перетворень, що заплутують (obfuscating transformations). Саме тому ряд сучасних наукових публікацій присвячені класифікації методів захищеності програмного коду, зокрема методам обфускації.

У роботі [3] проводилась розробка узагальненої класифікації обфускаційних методів захисту програмного коду, яка може дозволити розробляти надійні алгоритми захисту програмного коду від деобфускації. Обфускаційні методи дозволяють заплутувати код програми, тобто приводити вихідний текст до виду, що зберігає функціональність програми, але ускладнює аналіз, розуміння алгоритмів роботи та проведення модифікації програми.

У [4] запропоновано обфускатор, який перетворює вихідний код мобільного агента у незрозумілий код. Дослідження в основному зосереджене на обфускації мобільних агентів, в той час як техніка може бути використана для обфускації будь-якого програмного забезпечення.

Також із сумісним використанням нових підходів та модифікацій існуючих технологій обфускаційних методів захисту програмного коду необхідно постійно підсилювати безпеку кінцевих точок за допомогою шифрування [5], що додасть ще один рівень захисту пристроїв і даних.

У [6] автори пропонують метод обфускації для захисту програмного забезпечення, який забезпечує захист від зворотної інженерії. Метод базується на новій послідовності перетворень обфускації. Також розроблено програмний інструмент StiK, і на основі представленої послідовності операцій створено псевдокод для методу захисту. Проведено експериментальне дослідження за представленою методикою.

У [7] пропонується обфускатор байт-коду Micropython, заснований на обфускації потоку управління, який має перевагу в ефективності та зручності, автори реалізували та експериментували на платформі STM32L4. Результати тестування доводять, що обфускатор може значно підвищити складність злому байт-коду Micropython.

Пропонований підхід до обфускації в роботі [8] може бути використаний в програмах, які мають певну кількість підпрограм з однаковим інтерфейсом. При цьому, незалежно від складності реалізації, код кожної підпрограми може бути перетворений в деструктурований код. Особливістю запропонованого методу є використання лінійних конгруентних послідовностей в якості основи для відображення порядку розташування операторів мови на визначений функціональністю порядок виконання програми.

У роботі [1] синтезовано комплекс алгоритмів обфускації і деобфускації програмних модулів, який відрізняється від відомих урахуванням варіативності типів даних. Розроблено уніфіковану математичну модель процесу обфускації програмних модулів на базі методу графічної оцінки. В межах моделі розроблено алгоритми обфускації лексем, обфускації строкових виразів, обфускації імен ідентифікаторів та обфускації логічних виразів. Розроблено GERT-модель процесу обфускації програмних модулів та досліджено уніфіковану GERT-модель зі зміненою кількістю вузлів, проведено оцінку якості обфускації програмних модулів. Синтезовано апарат оцінки якості обфускації програмних модулів на основі показників якості програмного продукту. Також розроблено алгоритм отримання метрик якості коду програмного продукту.

З огляду на коло досліджень щодо сучасної класифікації методів захищеності програмного коду, можна стверджувати, що впровадження засобів обфускації й досягнення мети підвищення швидкості, якості та захищеності програмних продуктів наразі є актуальною проблемою.

Метою статті є аналіз використання обфускаційних методів захисту програмного коду, виокремлення особливостей їх реалізації та застосування, що дозволить у майбутньому розробляти методи та інформаційні технології підтримки ефективного розроблення захищеного коду.

Виклад основного матеріалу. Одним із поширених сучасних способів захисту програмного коду є використання обфускаційних методів. Неформально підобфускацією розуміється наведення вихідного тексту або виконуваного коду програми до виду, що зберігає її функціональність, але ускладнює аналіз, розуміння алгоритмів роботи та модифікацію після декомпіляції [3, 8].

Головна мета процесу обфускації у тому, щоб заплутати програмний код і приховати у ньому логічні зв'язки, тобто змінити його так, щоб він був складний для вивчення сторонніми особами [8].

Деобфускація – процес, зворотний процесу обфускації, тобто. він дозволяє, наскільки це можливо, повернути код у початковий вигляд, цим самим спростити процес реверсивної інженерії [3].

Формалізацію поняття обфускації зручно представити комутативною діаграмою (рис. 1). Дана формалізація відображає результати досліджень у роботах [9, 10] в термінах теорії множин.

На рис. 1 використані наступні позначення:

P – множина програм;

X – множина вихідних даних для програм із множини P ;
 Y – множина результатів виконання програм із множини P із вихідними даними із множини X ;
 v – відображення, що реалізує обчислювач (комп'ютер);
 O – множина обфускованих програм;
 θ – відображення, яке реалізується обфускатором (спеціальною програмою деякого обчислювача);
 X_1 – деяка підмножина множини X , $1X \subseteq X$ на діаграмі це відношення подано відповідним подовженим знаком,

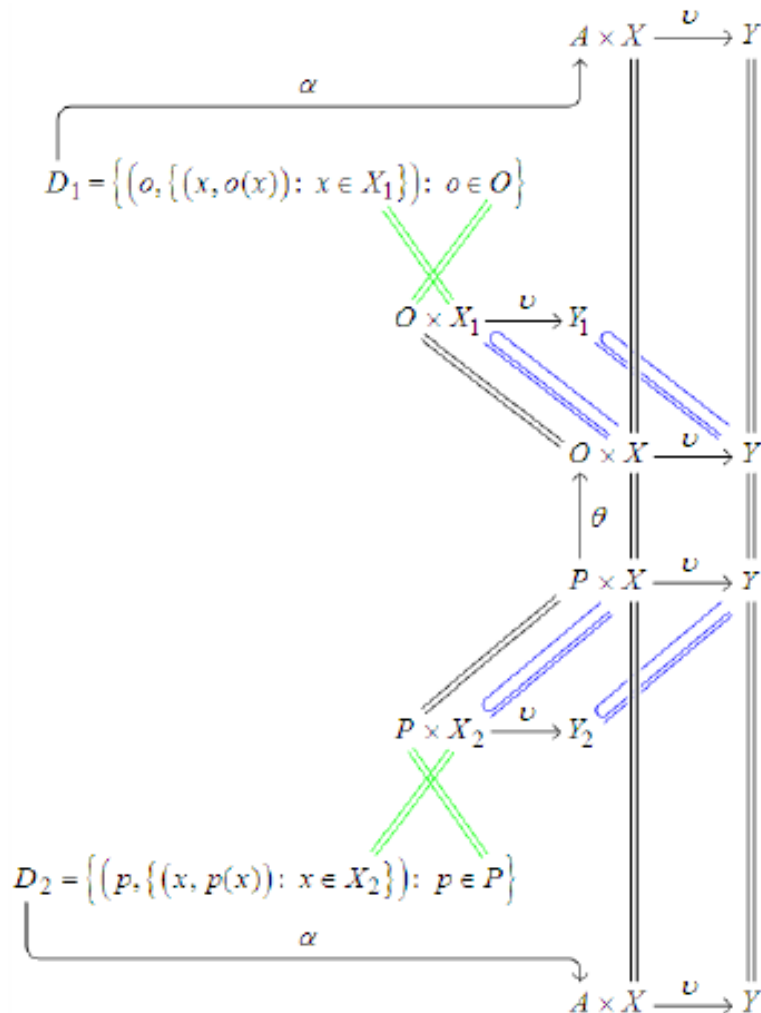


Рис. 1. Комутативна діаграма формального подання процесу обфускації

Y_1 – підмножина множини Y , $1Y \subseteq Y$, що містить результати виконання обфускованих програм із множини O із вихідними даними із множини X_1 ;

D_1 – множина обфускованих програм з деякою частиною прикладів їх виконання, що визначається множиною X_1 , та спостерігається суб'єктом, що здійснює атаку;

A – множина реконструйованих програм суб'єктом, що здійснює атаку, на основі дослідження елементів множини D_1 (або D_2) з використанням алгоритму реконструкції (рефакторингу), що представлений на діаграмі відображенням α ;

X_2 – деяка підмножина множини X , $2X \subseteq X$;

Y_2 – підмножина множини Y , $2Y \subseteq Y$ містить результати виконання програм із множини P із вихідними даними із множини X_2 ;

D_2 – множина обфускованих програм з деякою частиною прикладів їх виконання, що визначається множиною X_2 , та спостерігається суб'єктом, що здійснює атаку;

дві паралельні лінії (подовжений знак рівності) означає, що поєднання цим знаком множини – це одна і та ж сама множина, що подано синхронно, умовно, таке, що подається в кожний момент часу в кожній своїй позиції присутності одним і тим же своїм елементом.

У зв'язку з останнім зауваженням звернемо увагу на відсутність цього знака між множиною A, присутньою і у верхній, і нижній частині діаграми (це та сама множина, але представлена в кожній окремій ситуації різними своїми елементами, інакше кажучи, множина, представлена на діаграмі асинхронно).

Процес обфускації може бути здійснений на нижчому та вищому рівнях подання програмного коду: на нижчому рівні процес обфускації здійснюється над асемблерним кодом програми або безпосередньо над двійковим файлом програми, що зберігає машинний код; на вищому рівні процес обфускації здійснюється над вихідним кодом програми, написаним мовою високого рівня.

Залежно від способу модифікації коду програми розрізняють [8-13]:

- лексичну обфускацію;
- обфускування структур даних;
- обфускування потоку керування;
- превентивне обфускування.

Коротко охарактеризуємо вищезгадані методи [8-13]. Лексична обфускація – найпростіший метод обфускації, що полягає у форматуванні коду програми та модифікації його структури так, щоб він став нечитабельним, менш інформативним та складним для вивчення.

Обфускація цього виду включає: зміна коментарів на дезінформуючі або видалення в коді програми; видалення пробілів, відступів, які використовуються для кращого візуального сприйняття коду програми; заміну назв ідентифікаторів на випадкові набори символів, які людині важко сприйняти; додавання різних непотрібних операцій; зміна місць блоків програми так, щоб це не вплинуло на її здатність працювати.

Обфускація структур даних найчастіше використовується. Цей вид обфускації поділяють на три основні групи: обфускація зберігання; обфускування з'єднання; обфускування переупорядкування.

Обфускація зберігання передбачає перетворення сховищ даних та самих типів даних, наприклад створення та використання незвичних типів даних, зміна подання вже існуючих типів даних тощо.

Обфускація з'єднання ґрунтується на ускладненні представлення структур даних, що використовуються програмою. При цьому заплутування досягається шляхом з'єднання незалежних даних або розділення залежних:

Обфускація переупорядкування полягає у зміні черговості оголошення змінних, внутрішнього розміщення сховищ даних, а також у переупорядкуванні певних полів у структурах, масивах тощо.

Обфускація потоку управління [12] змінює послідовність виконання програмного коду (потoku управління). Існує кілька способів цього виду обфускації: додавання недосяжного коду; додавання «мертвого» коду; додавання надлишкового коду; «переплетення» функцій; «клонування» функцій; розгортання циклів; розпаралелювання коду; усунення бібліотечних викликів.

Превентивне обфускування призначене для запобігання використанню зловмисником деобфускаторів, декомпіляторів та інших програмних засобів деобфускації. Превентивна обфускація націлена на використання особливостей та недоліків, властивих найбільш відомим програмним засобам, які часто використовуються зловмисниками у процесі деобфускації.

Обфускація вихідного коду є особливо затребуваною для інтерпретованих мов програмування (Python, PHP, JavaScript), тобто для мов, де оператори транслюються та виконуються послідовно один за одним. Це зумовлено тим, що програми на таких мовах є скрипт-програмним сценарієм, що описує послідовність дій, що виконується інтерпретатором, а не виконуваний машинний код, що найчастіше складніше піддається аналізу, як у випадку з мовами з компілюванням (C, C++).

Для обфускації вихідних кодів, написаних на JavaScript, може використовуватися JS Obfuscator Tool [14]. Принцип його дії полягає у лексичному перетворенні, заміні імен функцій та змінних, видаленні коментарів та символів пропуску. Крім того, виконується конвертування рядків у шістнадцяткові послідовності та їх подальше кодування у base64.

Ще один обфускатор, що використовується для JavaScript, – це JS-obfuscator [15]. Дії, які він виконує, аналогічні JS Obfuscator Tool. Крім цього, він здійснює заплутування вбудованого HTML, PHP та іншого коду.

Як один із інструментів обфускації вихідних кодів на Python застосовувався «Ору» [16], що робить просту лексичну обфускацію. Він виконує заміну імен функцій та змінних на послідовності символів «l» та «1», а також перетворює рядки на набори випадкових символів. Як альтернативний інструмент використовується обфускатор Ruarmor [17], що здійснює заплутування на більш високому, ніж попередній розглянутий обфускатор. Обфускація відбувається у процесі виконання байт-коду кожного об'єкта, а очищення локальних змінних відбувається відразу після виконання функції.

Наведемо демонстраційний приклад застосування методу обфускації саме для байт-код орієнтованого програмного забезпечення. Мовою програмування Python та за допомогою бібліотек `os`, `datetime`, `hashlib`, `tkinter`, було розроблено тестову програму, що має функцію зміни дати редагування файлу і має обмежену кількість запусків. Кількість запусків записується до файлу `id.pas` зашифрованому вигляді, якщо дата редагування цього файлу відрізняється від 06.12.1998, програма завершує свою роботу. На рисунку 2 наведено фрагмент лістингу створеної програми.

```
import os
import datetime
import hashlib
import tkinter as tk

def get_computer_info():
    computer_info = os.environ.get('COMPUTERNAME', '') + \
os.environ.get('USERNAME', '') + \
os.environ.get('PROCESSOR_IDENTIFIER', '')
    return computer_info

def encrypt_counter(counter):
    computer_info = get_computer_info()
    key = hashlib.sha256(computer_info.encode()).digest()
    encrypted_counter = bytearray()
    counter_bytes = counter.to_bytes(4, 'big')
    key_len = len(key)
    for i, byte in enumerate(counter_bytes):
        encrypted_byte = byte ^ key[i % key_len]
        encrypted_counter.append(encrypted_byte)
    return bytes(encrypted_counter)

def decrypt_counter(encrypted_counter):
    computer_info = get_computer_info()
    key = hashlib.sha256(computer_info.encode()).digest()
    decrypted_counter = bytearray()
    key_len = len(key)
    for i, byte in enumerate(encrypted_counter):
        decrypted_byte = byte ^ key[i % key_len]
        decrypted_counter.append(decrypted_byte)
    return int.from_bytes(bytes(decrypted_counter), 'big')

def create_counter_file():
    filename = 'id.pas'
    counter = 10
    date = datetime.datetime(1998, 12, 6)
    try:
        if not os.path.exists(filename):
            encrypted_counter = encrypt_counter(counter)
            with open(filename, 'wb') as f:
                f.write(encrypted_counter)
            os.utime(filename, (date.timestamp(), date.timestamp()))
    except Exception as e:
        print(f'Помилка: {e}')
```

Рис. 2. Фрагмент лістингу розробленого програмного забезпечення

Розробники скриптів знають, що код Python підтримує аналіз байт-коду, що дозволяє прискорювати роботу інтерпретатора. А сам код Python дуже складно захистити від небажаного перегляду третіми особами, тому що легко можна отримати вихідний скрипт.py з файлу.exe. Саме тому виникла необхідність реалізації засобів захисту програмного коду написаного на Python. Для цього випадку передбачена бібліотека `PyArmor` [17], за допомогою якої можна скористатися всіма функціями захисту скрипту від небажаного злому, і яка реалізує метод обфускації.

На рисунку 3 подано варіант з автоматизованим обфускованим кодом, що був отриманий за допомогою бібліотеки `PyArmor`.

```

from pyarmor_runtime_000000 import __pyarmor__
__pyarmor__(__name__, __file__,
b'PY000000\x00\x03\n\x00o\r\n\x80\x00\x01\x00\x08\x00\x00\x00\x04\x00\x00\x00@
\x00\x00\x00\x16\x18\x00\x00\x12\t\x04\x001\n\xce\x1a\x7f\xa6\xf2\x0fDc\xfe'\xb1
\xab\xdf\x7c\x00\x00\x00\x00\x00\x00\x00\x00\x00\x00\x00\x00\x00\x00\x00\x00\x00\x00
d\x64_v\xceE\xcbk@\xb9\xe5\xa0n's\x0d\xdf1\xb7\x8b\x9c\x9aH\x8c\x11\xbf\x06:\xa
a\xe7\x0d4\xad\x03Q\x03j\x89\x9eCXRI\xb7\xab\x9c\x9e0_i\x8c\xfc\xaaasc\r+\xcc\xce94
\x02\xbf5\x01\x19\x08\\1[][\x05\xcf%]\x05$N\xa9/\x02\xa0!\% \xa8\xdc\x02\x01i\
x88\x05\x1a\x0e\xa0r\xb7\xbf\x0f\xfe\x07KZ\x87\x00\x09\x05i\xe8\x1e$ \x9c<\x9bd\x
82c*\xc9\xfe\x95\x8a\x05\xcb\xa2\x8a\xcd\x04\x9e)\xed\x19\x01U.B\x01\xe5|\xcb;\x
f2Fp\x05\x0e\x1cSW\x85jJ\x91C\x8cV"Y\x022\x04^?nb\x15\xad
\x01\x0fU~\xa0\x17\x85\xa4.\x18\x07\x03,\xa8\x0d\xdb[\x172\xa4\x05D\x1eA\x9d\x0b
c\x05\x7f\x7f\x02\xffF\xfd\x0fB\x81\x03aD\x02u\x04\x0f\x13\x09K~,Q\x84.5\x05J\x
f5t\x9e\xce\x85\x9d\x9e\t\xbb\xac/\xee\x15\x86\x0daU2n\x8eh\x0f\x1f\xa8ap_E\x0b6\
x95\x1b.W|\x0f\x1eS\x0dz_g\x0f5\xbb\x0d7\x0f6\x94p\x0e6\xa9]\xedJ\x03\x8c\x84\xfe\x0d
a?\xc5\x9a\x99|\xb2\xcd\x0f\x04\x06\x0d\x0f\x0f7j\x0f1C\x06\x08k\x0b\x0f\xff\x097
pUCp.\xf1h\xef\xff\x07[\x0d1\x9e\x93$ \x05\x0e\x80_\x1b8\x0faT\x05\x0e8&\xc3\xa5\x0c
2\\\x06\x04d\x0f\x0b\x0f6\x14\x0cf*1\x83\x95_\x11)w\x0e\x8a\x00{\xa5LZ\x05rD\x1f\x
e1!1\x0b\x0e6\x1f\x04\x85R\x04\x07\x1eY~\xac\x92\x0f\x0f\x0b\x0e\x00\x99wk\x05@K\
x04\x95En\xa9\n\x0cB53*\x027=\xf3\x0ba\x0d\x0b\x0d3\xff'\x828\x0b\x0f7\x0d\x09\x10
\x99\x0f7\x0faf8."d\x9b\x08\x0f8\x07\x0ce0\xfc\x99\x0e8
\x02\xdb\x04\xa2\x04\x82.: \xab\x0f1\x990-
\x93uJq\x86\x19\x97Y\x07s]\x0c\x94\x0bED\x0b7\x0f5\x0c55\x12
\x03\x0b3\x0e\x0bde\x0f9\x0cb\x0f1n\x0aap\x0e7\x86\x0fc\x03\rk\x08\x0bW7\xa9\x03a>\xed-
#?\x06\x0bfK\x0ca\x0e\x08\x0a\x0b1\xff-
8\x1a\x85x$ \x0e\x0d\x06\x0c1\x0ae\x05H\x0f\x0e\x0f\x0e|\x0ba\x01\x0c20\x98\x05\x0b2\
x9e\xa5\x0e\x0ea3\x0d\x03\x0e2\x0b\x0e\x85\x88\x0c\x0c1\x0fc\x0ef.\x0d3<\x01\x8f\x87a\x0fc\
xed0\x0d8."/ \x9a\x81\x0ca\x04\xa70\x0c6a\xa7\x85\x0c6\x0b4\x0c6\x9e\x8a\x0ca\x0d9\x0ee\x9
c?u\x16d\x0ae\xa7)\x80\x8f\x07j]\xb2\x00p\x1c\xfdAn\x0c\x0b4\x0b1\x0f6\x0eaz\x0b3\x0a0\x
b5\x0d1]]\xbW\x1fJ\x0d9\x1b\x0f9\x0ba\x10\x95\x0b3\x0ab0\x87\x98\x0ea5\x0c6\x0c9=diB\x0f\r
x87\x12\x0ba\x17\x0e8\x0f0i\x0f8\x1d\x0ae)\x0fd\x0d\x0c1BJ]\x05\x0fc\x0c8\x02q\x19\x0b;
\x0f1\x0f6j]\x0cd\x94\x03\x0e4\x0ac|\x80\x0af\x83\x0e\x0c8\x1f\x0c6\x98[\x0f2\x0fc)\x0f6\x
17\x0d4`\x0f\x0d0`\r\x0cd\x05\x0d3\x0d0\x1c\x96\x13\x19\x0b1TL=\x0f7\x8b\x93\x0e1\x0feqU\x
8e\x91\x0a8\x0d\x0cd\x014\x0aa(D\x0fa\x0d0\x93\x86L{\x08e\x0c0\\r\x0bbmJ\x08+\x1f\x0f\r
\x0d10\x87o\x8a\x95P>_\x0aa5>\x0b1\x84w\x0d5\x9b\x0fb\xa3\x90\x0c\x0a3\x0f3\x0ea\x0f4\x0b5
.\x0c4\x0c0cYD*\x0c1\x0cd\x0c5~\x0fbYS\x14\x0a2\x96{\x0e4\x08e,\x88H\x86,v}\x0a4\x05\x0f3\x
d4\x0a4#\x83\x0d5\x0fc-
\x96\x84\x94?\x0f\x0c8\x0f0`C\x04\x0d5.\xed\x0ee\x0fc\x19o\x0cb\x87\x0d4\x99\x0fb\x92\x8
a\x0fb$ \x1a\x0b1C\x0cf\x0e\x0c6\x04Q\x0b6Lma\x8bx\x1d\x0d4\x0b1X\x0dd*\x0e4\x0d9\x0a2\x0df!\
x91\x0bb\x04\x0b4I+\x8c\x0d9\x0dbSY\x1c\x0d\x0b9\xa4\t\x0d4b\x0d0>6\x0f2\x99\x1a\x0d9X\x1
e+\x0fa\x0fc\x0c8\x0e3\x017\x0a8\x0cd&3\x0f4\x0fd\xa8\x98\x0c2\x0e3a\x8b\xa8\x8dE\x0f\x03i
\xa9\x0ee\x0c2\xa5w\x0ed16N`\x0ee\x02!\x06n\x0bc\x0c0>~\x84\x0d3\x97d\x0c4\x96\x0c6\x1c\x
01\x86[\x15kGY\x0bfQ\x0d9\x0f0!q\x19\x9b\x0d3\x07f\x0d4\x0d9\x0d3)m'\x8c\x0b380\x0b1\x0f86
<c9\x0ceU\x0bc\x0b0\x05\x1aJr\x03\x0f5\x19\x0b6\xa1\xffVa\x0dar\x0e5\x0cc\x0d9AF\x0fc\x0ab\
x0d1\xa8\x0d1\x8a\x0ef\x0b3'\x91\x0cb\x0a6\x0df\x0ee\x84-
\x93\x9b\x0af\x11\x83v\x0cd\t:XC\x0b6I\x0cbW\xa4\x0d5)\x0b1Z\x0deo\x0b1TC0y\x0f01Z\x0dak\x
ca\x885\x0c9\x0c6\x0bc\x0e6;\x8e\x0f4\x0ca\x0d\x83\x1ee\x0e4>\x85)w\x0f0\x99\x90\x0bc\x9a
\x9b[\x0c0\x9d\x0df7\x0ed\x92y; \x0df\xa2~L4\x94Is\xff\x03\x06<\x0b3\nu\x0bf\x0ee-
\x9f0\x0e2\x0f6\x0df\x9b<,\x1e`jZI\x0d2\x0e1\x0b8\x98\x0ae\x0c1\x8e\x0c0\x0fc\x0f9\x0fe\x0d7
2\x13\xa9\x853E\x0e1\xa5f+\x0c8B\xa27\x94#\x12\x0b7\x0b1\x04K\x0f2`\x0bf\x0d3\x0fb(\x0c6\
xc9Zq\xa8\xa09\xa4S\x0fee\x0bd\x83\x91Q]

```

Рис. 3. Фрагмент лістингу обфускованого коду програми, що був згенерований за допомогою руArmor

Сучасними методами підвищення безпеки програмного коду [3, 6, 8], зокрема методами обфускації, цікавляться не лише розробники програмних продуктів. Великий інтерес до цього методу захисту програмного коду виявляють і зловмисники, які мають на меті якомога довше залишатися непоміченими при скоєнні комп'ютерних атак, заснованих на використанні шкідливого програмного забезпечення, наприклад, вірусних програм. Проаналізуємо цілі, які ставлять перед собою зловмисники, а також розробники ПЗ, та задачі, які вони можуть реалізувати, використовуючи методи обфускації та деобфускації.

Серед основних цілей застосування методів обфускації зловмисниками можна виокремити такі [3, 6, 8-17]:

1. Приховування сигнатур вірусного програмного забезпечення для затруднення його виявлення антивірусними комплексами. Часто більшість антивірусів використовують такі прийоми виявлення, як розпізнавання вірусів за їх сигнатурою, виявлення аномалій поведінки програм та інше. Так, наприклад, метод виявлення вірусу по сигнатурах корисний тільки в тому випадку, коли чергова сигнатура,

що знайшлася, за принципом дії практично не відрізняється від шаблонної. Для обходу такого способу виявлення антивірусом може використовуватися обфускація: при кожній новій реплікації вірус використовує обфускаційні перетворення, які дозволяють отримувати на виході різні за структурою модифікації одного і того ж вірусу, які не розпізнаються антивірусом як та сама сигнатура вірусної програми.

2. Захист програмного коду від аналізу з метою приховування вірусного програмного забезпечення.

Оскільки, майже усі цілі деобфускації безпосередньо залежать від цілей обфускації, то основні цілі застосування деобфускаторів розробниками програмного забезпечення такі:

1. Виявлення антивірусами сигнатур вірусного ПЗ. Як було зазначено вище, за допомогою методів обфускації можна приховати сигнатури вірусного ПЗ у вигляді зміни його структури під час проходження чергової реплікації. Якщо антивірус для виявлення сигнатур буде використовувати засоби деобфускації, ймовірність виявлення сигнатур вірусного програмного забезпечення зросте, отже, зросте стійкість антивірусу;

2. Дослідження програми щодо наявності у ньому шкідливого коду. Деобфускація шкідливого коду та його аналіз може проводитись фахівцями із захисту інформації.

Серед основних цілей застосування методів деобфускації зловмисниками можна виокремити такі [3, 6, 8]:

1. Деобфускація програмного коду продукту з метою незаконного копіювання, зміни, використання у власних цілях вихідного коду програми. Зловмисник після застосування деобфускаторів над обфускованим кодом може використовувати його з наступною метою:

- модифікувати код, тобто внести до програми зміни, які можуть призвести до суттєвих змін або повного блокування алгоритму роботи програми;
- скопіювати код та присвоїти собі авторські права;
- скопіювати та розповсюдити програмний продукт безкоштовно або за плату меншу, ніж плата, оголошена розробником (піратство);

2. Оптимізація коду. І деобфускація, і оптимізація програмного коду тією чи іншою мірою протилежні процесу обфускації. Оскільки у процесі обфускації в програмний код часто здійснюється додавання зайвих операцій, які зазвичай ніяк не впливають на результати роботи самої програми та призначені для утруднення процесу вивчення програмного коду сторонніми особами, то процес деобфускації можливо використовувати з метою оптимізації коду. Крім того, потрібно розуміти, що під час компіляції програмного коду здійснюється і його оптимізація. Отже, слід зазначити, що більшість компіляторів у процесі компіляції вихідного коду автоматично здійснюють процес оптимізації, тому, якщо процес обфускації здійснюється над вихідним кодом програми (обфускація високого рівня), виникає певна ймовірність того, що її ефективність після процесу компіляції знизиться. Якщо ж такий вихідний код буде підданий обробці інтерпретатором (тобто не буде схильний до компіляції), ефективність виконаного процесу обфускації не зміниться [16, 17].

Як бачимо, застосування методів обфускації коду можуть мати як позитивні так і негативні наслідки щодо програмного забезпечення в залежності від того, хто та з якою ціллю їх використовує.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Методи захисту програмного забезпечення від дослідження з метою реалізації деструктивних впливів необхідно вивчати для того, щоб розуміти як зловмисник може приховувати шкідливі програми в атакованому програмному коді і, навпаки, розробник програмного забезпечення може, застосовуючи такі методи, захистити програми від зловмисника, який намагається впровадити в них свої шкідливі програми.

Одним із ефективних способів захисту програмних продуктів є використання обфускаційних методів захисту програмного коду. Однак потрібно розуміти, що одна лише обфускація не забезпечує ефективного захисту програм, оскільки вона не запобігає незаконному використанню програмного продукту. Тому обфускацію прийнято використовувати разом із іншими методами захисту, адже проблема захисту інтелектуальної власності набуває сьогодні неабиякої актуальності.

У статті здійснено аналітичний огляд методів обфускації програмного коду, виокремлені особливості їх реалізації та застосування залежно від цілей їх використання. Враховуючи отримані результати проведеного аналізу, розроблені рекомендації щодо технологій застосування обфускації коду. Зокрема розглянуті варіанти спільного використання методів обфускації з іншими методами захисту програмного забезпечення від дослідження та аналізу з метою зниження ризику виникнення та реалізації загроз безпечі розробленого програмного продукту. В перспективі в подальших дослідженнях пропонується модифікувати реалізацію алгоритму одного із розглянутих методів обфускації на основі використання операцій криптографічного кодування для підсилення безпеки кінцевих точок за допомогою шифрування, що додасть ще один рівень захисту пристроїв і даних. Також дане дослідження спонукає у майбутньому розробити методи та інформаційні технології підтримки ефективного розроблення захищеного коду.

Список використаних джерел:

1. Давидов В.В. Моделі та методи підвищення безпеки байт-код орієнтованого програмного забезпечення в умовах кібератак : дис. д-ра техн. наук : 05.13.05 / Давидов Вячеслав Вадимович. Харків, 2021. 313 с. Режим доступу: <https://er.chdtu.edu.ua/handle/ChSTU/2577>
2. Важливість системи захисту кінцевих точок URL: <https://www.microsoft.com/uk-ua/security/business/security-101/what-is-an-endpoint>
3. Stepanenko I., Kinzeryavyy V., Nagi A., Lozinskyi I. Modern obfuscation methods for secure coding. *Ukrainian Scientific Journal of Information Security*. 2016, vol. 22 (1), issue 1, p. 32-37. Режим доступу: doi.org/10.18372/2225-5036.22.10451
4. Garg, V., Srivastava, A., Mishra, A. Obscuring mobile agents by source code obfuscation. *Int. J. Comput. Appl.*, 2013. 61(9), 46-50.
5. Svitlana Sysoienko, Iryna Myronets, Vira Babenko. Practical Implementation Effectiveness of the Speed Increasing Method of Group Matrix Cryptographic Transformation. *CEUR Workshop Proceedings* 2353. 2019. p.402 – 412. (Scopus). ISSN 1613-0073. Режим доступу: doi.org/10.32782/cmis/2353-32
6. Gnatyuk, S., Kinzeryavyy, V., Stepanenko, I., Gorbatyuk, Y., Gizun, A., Kotelianets, V. Code Obfuscation Technique for Enhancing Software Protection Against Reverse Engineering. In: Hu, Z., Petoukhov, S., He, M. (eds) *Advances in Artificial Systems for Medicine and Education II. AIMEE2018 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020. Vol 902. pp. 571-580. Springer, Cham. Режим доступу: https://doi.org/10.1007/978-3-030-12082-5_52
7. Lantao Wang; Yun Li; Haitao Zhang; Qigu Han; Lirong Chen. (2021). An Efficient Control-flow based Obfuscator for Micropython Bytecode. 7th International Symposium on System and Software Reliability (ISSSR), 23-24 September 2021. Chongqing, China. *INSPEC Accession Number*: 21481418. Режим доступу: [doi: 10.1109/ISSSR53171.2021.00028](https://doi.org/10.1109/ISSSR53171.2021.00028)
8. Бондарчук А.П., Корнага Я.І., Базалій М.Ю., Сергієнко П.А., Ілін О.Ю. Метод захисту програмного коду від аналізу засобами обфускації. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. 2020. № 4 (69). С. 140-148. Режим доступу: [doi: 10.31673/2412-4338.2020.045051](https://doi.org/10.31673/2412-4338.2020.045051)
9. Barak, B., Goldreich, O., Impagliazzo, R., Rudich, S., Sahai, A., Vadhan, S., Yang, K. On the (im)possibility of obfuscating programs. *Journal of the ACM*. 2012. Vol. 59. Iss. 2. Article No. 6. 48 p. Режим доступу: [DOI:10.1145/2160158.2160159](https://doi.org/10.1145/2160158.2160159)
10. Goldwasser, S., & Guy, N. R. On best-possible obfuscation. *Fourth IACR Theory of Cryptography Conference, TCC 2007*, February 21-24 2007. Amsterdam: KNAW Trippenhuis, 2007. P. 194-213.
11. Barak, B., Goldreich, O., Impagliazzo, R., Rudich, S., Sahai, A., Vadhan, S., Yang, K. On the (Im)possibility of Obfuscating Programs. *LNCS*, 2010. P. 1-18.
12. Chow, S., Gu, Y., Johnson, H., Zakharov, V. An approach to the obfuscation of control-flow of sequential computer program. *LNCS*, 2001. P. 144-155.
13. Garg S., Gentry C., Halevi S., Raykova M., Sahai A., and Waters B. Candidate indistinguishability obfuscation and functional encryption for all circuits. *FOCS*, 2013. P. 22-23.
14. JS Obfuscator Tool. URL: <https://obfuscator.io/>
15. JS-obfuscator. URL: <https://github.com/caiguanhao/js-obfuscator>
16. Opy. URL: <https://github.com/QQuick/Opy>
17. Pyarmor. URL: <https://github.com/dashingsoft/pyarmor>

References:

1. Davydov, V.V. (2021). Modeli ta metody pidvyshchennia bezpeky bait-kod oriientovanoho prohramnoho zabezpechennia v umovakh kiberatak [Models and methods of increasing the bytecode-oriented software security of during cyberattacks]. Doctor's thesis. Kharkiv. Retrieved from <https://er.chdtu.edu.ua/handle/ChSTU/2577> [in Ukrainian].
2. Vazhlyvist systemy zakhystu kintsevykh tochok. [The importance of an endpoint security system]. Retrieved from <https://www.microsoft.com/uk-ua/security/business/security-101/what-is-an-endpoint> [in Ukrainian].
3. Stepanenko I., Kinzeryavyy V., Nagi A., Lozinskyi I. Modern obfuscation methods for secure coding. *Ukrainian Scientific Journal of Information Security*. 2016, vol. 22 (1), issue 1, p. 32-37. Retrieved from doi.org/10.18372/2225-5036.22.10451 [in English].
4. Garg, V., Srivastava, A., Mishra, A. (2013). Obscuring mobile agents by source code obfuscation. *Int. J. Comput. Appl.* 61(9), 46-50 [in English].
5. Svitlana Sysoienko, Iryna Myronets, Vira Babenko. (2019). Practical Implementation Effectiveness of the Speed Increasing Method of Group Matrix Cryptographic Transformation. *CEUR Workshop Proceedings* 2353. p.402 – 412. Retrieved from <https://ceur-ws.org/Vol-2353/paper32.pdf> [in English].
6. Gnatyuk, S., Kinzeryavyy, V., Stepanenko, I., Gorbatyuk, Y., Gizun, A., Kotelianets, V. (2020). Code Obfuscation Technique for Enhancing Software Protection Against Reverse Engineering. In: Hu, Z., Petoukhov, S., He, M. (eds) *Advances in Artificial Systems for Medicine and Education II. AIMEE2018 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 902. pp. 571-580. Springer, Cham. Retrieved from https://doi.org/10.1007/978-3-030-12082-5_52 [in English].
7. Lantao Wang; Yun Li; Haitao Zhang; Qigu Han; Lirong Chen. (2021). An Efficient Control-flow based Obfuscator for Micropython Bytecode. 7th International Symposium on System and Software Reliability (ISSSR), 23-24 September 2021. Chongqing, China. *INSPEC Accession Number*: 21481418. Retrieved from <https://doi.org/10.1109/ISSSR53171.2021.00028> [in English].
8. Bondarchuk, A.P., Kornaha, Ya.I., Bazalii, M.Yu., Serhienko, P.A., Ilin, O.A. (2020). Metod zakhystu prohramnoho kodu vid analizu zasobamy obfuskatsii [Method of protecting software code from analysis by obfuscation means]. *Telekomunikatsiini ta informatsiini tekhnologii – Telecommunication And Information Technologies*, 4(69), 140-148. Retrieved from <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2020.045051> [in Ukrainian].

9. Barak, B., Goldreich, O., Impagliazzo, R., Rudich, S., Sahai, A., Vadhan, S., Yang, K. (2012). On the (im)possibility of obfuscating programs. *Journal of the ACM*. Vol. 59. Iss. 2. Article No. 6. 48 p. Retrieved from <https://doi:10.1145/2160158.2160159> [in English].
10. Goldwasser, S., & Guy, N. R. (2007). On best-possible obfuscation. *Fourth IACR Theory of Cryptography Conference, TCC 2007*, 194-213 [in English].
11. Barak, B., Goldreich, O., Impagliazzo, R., Rudich, S., Sahai, A., Vadhan, S., Yang, K. (2010). On the (Im)possibility of Obfuscating Programs. *LNCS*, 1-18 [in English].
12. Chow, S., Gu, Y., Johnson, H., Zakharov, V. (2001). An approach to the obfuscation of control-flow of sequential computer program. *LNCS*, 144-155 [in English].
13. Garg S., Gentry C., Halevi S., Raykova M., Sahai A., and Waters B. (2013). Candidate indistinguishability obfuscation and functional encryption for all circuits. *FOCS*, 22-23 [in English].
14. JS Obfuscator Tool. Retrieved from <https://obfuscator.io/> [in English].
15. JS-obfuscator. Retrieved from <https://github.com/caiguanhao/js-obfuscator> [in English].
16. Opy. Retrieved from <https://github.com/QQuick/Opy> [in English].
17. Pyarmor. Retrieved from: <https://github.com/dashingsoft/pyarmor> [in English].

УДК 004.9:005.8

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.2.9>

Marian SLABINOHA

PhD, Associate Professor, Associate Professor at Computer Systems and Networks Department, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Karpatska str., 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76019 (marian.slabinoha@nung.edu.ua)

Taras MYKHAILOV

Product Manager, Contractor at Dev.Pro, Klovskiy uzviz str., 7, Kyiv, Ukraine, 01021 (taras.mykhailov@gmail.com)

Мар'ян СЛАБІНОГА

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних систем і мереж, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, Івано-Франківськ, Україна, індекс 76019 (marian.slabinoha@nung.edu.ua)

ORCID: 0000-0002-7296-0356

Тарас МИХАЙЛОВ

продакт менеджер, контрактор, Dev.Pro, вул. Кловський узвіз, 7, Київ, Україна, індекс 01021 (taras.mykhailov@gmail.com)

ORCID: 0009-0006-3071-2529

Bibliographic description of the article: Slabinoha M., Mykhailov T. (2023). Zastosuvannya metodiv ekspertnoi otsinky pry prohnouzuvanni terminiv vykonannya proektiv v haluzi IT [Using expert judgement techniques to estimate IT projects completion time]. *Informatsiini tekhnologii ta suspilstvo – Information technology and society*, 2(8), 79–83. DOI: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.2.9>

Бібліографічний опис статті: Слабінога М., Михайлов Т. Застосування методів експертної оцінки при прогнозуванні термінів виконання проектів в галузі IT. *Інформаційні технології та суспільство*. 2023. Вип. 2(8). 79–83. DOI: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.2.9>

USING EXPERT JUDGEMENT TECHNIQUES TO ESTIMATE IT PROJECTS COMPLETION TIME

Accurate estimation is crucial for the success of software development projects, but overestimation or underestimation of tasks remains a common issue. This article aims to explore the use of expert judgement techniques to improve IT project completion estimations. Expert judgement involves seeking input from experienced professionals to estimate the work required for a task. However, expert judgement is subject to biases and cognitive biases that can affect the accuracy of estimates. This research examines the causes of over and underestimation in software development projects and proposes practical solutions to reduce the risks associated with expert judgement estimation.

The study utilizes a case study approach and compares single-point estimation with the Program Evaluation and Review Technique (PERT) to improve accuracy. The results demonstrate that PERT estimation provides a range of estimates with an expected case, and the average estimation is closer to the best case than the original estimates. Additionally, confidence intervals are calculated to provide a range of estimates at different confidence levels. The findings of the study demonstrate that PERT estimation, with its range of estimates and expected case calculation, improves estimation accuracy compared to single-point estimation. Additionally, the research calculates the Mean Relative Error (MRE) to measure the accuracy of estimates, indicating the potential for ongoing improvement in estimation accuracy. This article contributes to the field of IT project management by highlighting the importance of expert judgement techniques, identifying the challenges associated with over and underestimation, and providing practical tools and methodologies to enhance estimation accuracy. By minimizing subjectiveness and continuously improving estimates, IT projects can be delivered on time and within budget, leading to improved project outcomes and stakeholder satisfaction.

Key words: project management, project estimation, expert judgement, PERT, confidence intervals.

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ЕКСПЕРТНОЇ ОЦІНКИ ПРИ ПРОГНОЗУВАННІ ТЕРМІНІВ ВИКОНАННЯ ПРОЕКТІВ В ГАЛУЗІ IT

Точна оцінка має вирішальне значення для успіху проектів розробки програмного забезпечення, але переоцінка або недооцінка завдань залишається загальною проблемою. Метою статті є дослідження використання методів експертної оцінювання для покращення оцінки термінів виконання IT-проекту. Експертне судження передбачає звернення до досвідчених професіоналів для оцінки роботи, необхідної для виконання завдання. Однак експертне судження піддається суб'єктивізму і когнітивним упередженням, які можуть вплинути на точність оцінок. У цьому дослідженні розглядаються причини завищеної та заниженої оцінки в проектах розробки програмного забезпечення та пропонуються практичні рішення для зменшення ризиків, пов'язаних з експертною оцінкою. У дослідженні вико-

ристовується підхід *case study* та порівнюється одинарна оцінка з технікою оцінки та перегляду програми (PERT) для підвищення точності. Результати демонструють, що оцінка PERT надає діапазон оцінок із очікуваним результатом, а середня оцінка ближча до найкращого випадку, ніж початкові оцінки. Крім того, обчислюються довірчі інтервали, щоб забезпечити діапазон оцінок на різних рівнях довіри. Результати дослідження демонструють, що оцінка PERT із її діапазоном оцінок і розрахунком очікуваного випадку покращує точність оцінки порівняно з одинарною оцінкою. Крім того, дослідження розраховує середню відносну похибку (MRE) для вимірювання точності оцінок, що вказує на потенціал для постійного вдосконалення точності оцінок. Ця стаття робить внесок у сферу управління IT-проектами, підкреслюючи важливість методів експертного оцінювання, визначаючи проблеми, пов'язані з перевищенням і заниженням оцінки, а також надання практичних інструментів і методологій для підвищення точності оцінки. Завдяки мінімізації суб'єктивності та постійному вдосконаленню оцінок IT-проекти можна реалізувати вчасно та в рамках бюджету, що призведе до кращих результатів проекту та задоволення зацікавлених сторін.

Ключові слова: керування проектами, оцінка часозатратності проекту, експертна оцінка, PERT, довірчі інтервали.

Problem statement. In software development, accurate estimation is critical to the success of any software development project, as it helps in determining the timeline, budget, and resource allocation required for project completion [1;2]. However, despite the availability of various estimation techniques and tools, overestimation or underestimation of project tasks remains a common issue. Therefore, the issue of expert judgement in software estimation, the causes of over or underestimation, and provide practical tips for achieving accurate estimation in software development projects are the crucial topics to discuss and investigate in the field of IT projects management.

Overestimation or underestimation of project tasks can lead to project delays, budget overruns, and unsatisfactory outcomes, causing frustration for project stakeholders and affecting business outcomes. Expert judgement plays a crucial role in software estimation, as it involves the subjective assessment of project requirements, complexity, and uncertainty. Despite the availability of various estimation techniques and tools, overestimation or underestimation of tasks remains a common issue in software development projects. Therefore, understanding the causes of over or underestimation and learning how to avoid them can significantly improve project outcomes and ensure that software development projects are delivered on time and within budget.

Latest research and publications analysis. There is the wide of publications dedicated to software estimation techniques, with comparative analysis [3; 4], data driven approaches [5], and, obviously, containing practitioners perspective [6]. Still, the problem of over- and underestimation of time effort to complete IT projects and their sub-features is big challenges for project and product managers.

Aim of the research. The aim of this research is to examine the issue of over and underestimation in software development projects and provide practical solutions for reducing the risks associated with expert judgement software estimation.

Methodology. Expert judgement [7; 8] is one of the most common methods for software estimation. It involves seeking input from experienced professionals to arrive at an informed estimate of the work required to complete a task. However, despite its potential benefits, expert judgement can be fraught with challenges and limitations.

Expert judgement is the process of seeking input from a single expert (or a group of experts) to estimate a software development task. This approach can be effective when the task is well defined and the expert has relevant experience and knowledge. However, there are several limitations to individual expert judgement that must be considered.

Firstly, experts may have biases that can affect their estimates. These biases can arise from various sources, such as personal experience, beliefs, or preferences. For example, an expert who has experience with a particular technology may be biased towards overestimating tasks related to that technology.

Secondly, experts may be prone to cognitive biases that can affect their estimates. These biases can lead to over or underestimation of tasks. For example, experts may be influenced by the anchoring effect, where the first estimation they receive from colleagues anchors their subsequent estimates.

Thirdly, experts may have limited knowledge or experience in certain areas. This can lead to underestimation of tasks that require expertise in those areas.

Case study. Consider the following case: team has to estimate a new feature for an existing product. It is a mature product with more than 20 years of development history. Unfortunately, the team joined this product about 6 months ago. It means that the team already has some experience and historical data within this project, but not a lot. The unknown area is much bigger than known. Estimates should be provided within a day so there is no possibility to spend a lot of time on requirements, design, etc.

Estimation process. Firstly, the single-point estimation technique was used. Judgement estimation in its essence means that we need to get the experts in one place and ask them to estimate the feature, and this was done in this case.

One of the best ways to improve the accuracy of the feature estimate is to split it into smaller sub-features. This was done, taking into account the rule that every sub-feature should be done in 2 weeks or less by one developer. “Done” means that it should be developed, reviewed, merged, tested and as the result successfully closed. The results of estimation are presented in table 1.

Table 1

Project estimation using single-point estimation

Sub-feature	Estimated Days to Complete
Sub-feature 1	6
Sub-feature 2	4
Sub-feature 3	6
Sub-feature 4	10
Sub-feature 5	6
Sub-feature 6	6
Sub-feature 7	5
Total	43

Usually estimation ends on this stage. Some project managers add 30% as a ‘safe days’ and show this number to the stakeholders, which in our case would be about 56 days. During such estimation presentation to stakeholders they usually ask details how the current estimate was reached. And as soon as they understand that the original estimate was 43 days and 13 days were added by the manager, the last number is totally ignored and 43 days is considered as the commitment.

Single-Point Estimation does not provide any flexibility or ranges. To compare these results to more sophisticated technique, Program Evaluation and Review Technique (PERT) was used next [9;10;11]. It enables the calculation of an Expected Case that may not necessarily be in the middle of the range from the best case to the worst case.

After a short break previously estimated numbers were hidden from experts. Now they were asked to estimate the Best Case and the Worst Case. Best case means that everything will go smoothly and no problems should appear. Worst case means that everything will go wrong.

The results of estimation are presented in table 2.

Table 2

Project estimation using PERT technique estimation

Sub-feature	Estimated Days to Complete	
	Best Case	Worst Case
Sub-feature 1	5	10
Sub-feature 2	3	5
Sub-feature 3	3	10
Sub-feature 4	10	20
Sub-feature 5	5	10
Sub-feature 6	5	10
Sub-feature 7	5	10
Total	36	75

When original single-point estimates are compared to the Best Case and the Worst Case estimates, we can see that the original 43 days total is much closer to the Best Case estimate of 36 days than to the Worst Case of 75 days.

To find the Best Case and the Worst Case is a very important step, but it provides too wide range of possible estimates and the following question is still valid: “What estimate should be used?” The answer is none of the above, including original estimates. And the average estimate cannot be used too, because usually the Worst Case is much worse than what’s called the Expected Case. Taking the average of the ranges can result in an unnecessary high estimate.

To properly use PERT technique an additional Most Likely Case estimation is added, which is also estimated using expert judgement estimation.

The results after adding Most Likely Case estimation are presented in table 3.

Table 3

Project estimation using PERT technique estimation with Most Likely Case added

Sub-feature	Estimated Days to Complete		
	Best Case	Most Likely Case	Worst Case
Sub-feature 1	5	6	10
Sub-feature 2	3	4	5
Sub-feature 3	3	6	10
Sub-feature 4	10	15	20
Sub-feature 5	5	6	10
Sub-feature 6	5	6	10
Sub-feature 7	5	6	10
Total	36	51	75

As the result, the Most Likely Case is still closer to the Best Case of 36 days, but it is higher than the original estimates of 43 days.

According to the PERT we can use the following formula to calculate the Expected Case:

$$\text{Expected Case} = (\text{Best Case} + (4 \times \text{Most Likely Case}) + \text{Worst Case}) / 6$$

This formula accounts for the full width of the range as well as the exposition of the Most Likely Case within the range. The Table 4 represents results from the previous table with the addition of Expected Case.

Table 4

Project estimation using PERT technique estimation with Most Likely Case added

Sub-feature	Estimated Days to Complete			
	Best Case	Most Likely Case	Worst Case	Expected Case
Sub-feature 1	5	6	10	6.5
Sub-feature 2	3	4	5	4.0
Sub-feature 3	3	6	10	6.17
Sub-feature 4	10	15	20	15
Sub-feature 5	5	6	10	6.5
Sub-feature 6	5	6	10	6.5
Sub-feature 7	5	6	10	7.83
Total	36	51	75	52.50

As a result the Expected Estimation is 52.50 days.

Although PERT estimation technique results provide more than just one number, they are still numbers with no confidence level. To do that we need to calculate Range first using the following formulas:

$$\text{Lower Bound} = \text{Expected Case} - (\text{Range} * Z)$$

$$\text{Upper Bound} = \text{Expected Case} + (\text{Range} * Z)$$

The Z-value [12] is based on standard normal distribution and it is different for different confidence levels.

Based on this data, Lower and Upper Bounds can be calculated for each confidence level. They will represent the range of estimates.

Table 5

Calculating Upper and Lower Bounds based on Z-value

Confidence Level	Lower Bound	Upper Bound
80%	$52.5 - (6.5 * 1.282) \approx 44,17$	$52.5 + (6.5 * 1.282) \approx 60,83$
85%	$52.5 - (6.5 * 1.440) \approx 43,14$	$52.5 + (6.5 * 1.440) \approx 61,86$
90%	$52.5 - (6.5 * 1.645) \approx 41,81$	$52.5 + (6.5 * 1.645) \approx 63,19$
95%	$52.5 - (6.5 * 1.960) \approx 39,76$	$52.5 + (6.5 * 1.960) \approx 65,24$
99%	$52.5 - (6.5 * 2.576) \approx 35,76$	$52.5 + (6.5 * 2.576) \approx 69,24$
99.9%	$52.5 - (6.5 * 3.291) \approx 31,11$	$52.5 + (6.5 * 3.291) \approx 73,89$

In IT project management, confidence level below 90% is considered too risky, everything above has too wide range. It means that with a 90% confidence level, the estimated effort falls within the range of approxi-

mately from 42 to 63 days. The range is still big (50% difference) and a lot of stakeholders usually ignore the second number, but detailed explanation of how those numbers occurred always helps.

Comparison of estimates to actual results. The Expected Case estimation of 52.50 days in addition to the range 42-63 days (with 90% confidence level) were provided to the stakeholders. Those are important numbers, but they mean a little without comparing it to the Actual Results. In addition Mean Relative Error (MRE) should be calculated using the following formula:

$$\text{MRE} = |(\text{Actual Result} - \text{Expected Case}) / \text{Actual Result}|$$

Table 6 represents expected and actual results, as well as MREs for all sub-features.

Table 6

Comparison of expected and actual results

Sub-feature	Estimated Days to Complete		
	Expected Case	Actual Results	MRE
Sub-feature 1	6.5	6	8%
Sub-feature 2	4.0	2	100%
Sub-feature 3	6.17	6	3%
Sub-feature 4	15	20	25%
Sub-feature 5	6.5	10	35%
Sub-feature 6	6.5	8	19%
Sub-feature 7	7.83	7	12%
Total	52.50	59	
Average MRE for sub-feature estimates			29%

Discussion of the results and conclusions. In the table 5, the MRE is calculated for each estimate. The average MRE is 29% for the set of estimates. It can be used to measure accuracy of estimates. As estimates improve, MRE should go down.

Expert judgement estimation is the most popular estimation in the world. Based on different researches from 70% to 90% of all project estimates were based on expert judgement estimation.

It is very common, but also very risky, because it provides too many subjective numbers. The following article aimed to minimise subjectiveness and, which is more important, provides a tool to constantly improve estimates.

References:

1. Steve McConnell. (2006). Software Estimation. Microsoft press.
2. Richard D. Stutzke. (2005) Estimating Software-intensive Systems: Projects, Products, And Processes. Addison-Wesley Professional.
3. Shekhar, S., & Kumar, U. (2016, May 17). Review of Various Software Cost Estimation Techniques. International Journal of Computer Applications, 141(11), 31–34. <https://doi.org/10.5120/ijca2016909867>
4. Aljohani, M., & Qureshi, R. (2017, November 30). Comparative Study of Software Estimation Techniques. International Journal of Software Engineering & Applications, 8(6), 39–53. <https://doi.org/10.5121/ijsea.2017.8603>
5. Alsaadi, B., & Saeedi, K. (2022). Data-driven effort estimation techniques of agile user stories: a systematic literature review. Artificial Intelligence Review, 55(7), 5485–5516.
6. Sandeep, R. C., Sánchez-Gordón, M., Colomo-Palacios, R., & Kristiansen, M. (2022, January). Effort estimation in agile software development: a exploratory study of practitioners' perspective. In Lean and Agile Software Development: 6th International Conference, LASD 2022, Virtual Event, January 22, 2022, Proceedings (pp. 136–149). Cham: Springer International Publishing.
7. Rae, A., & Alexander, R. (2017, November). Forecasts or fortune-telling: When are expert judgements of safety risk valid? Safety Science, 99, 156–165. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.02.018>
8. Jørgensen, M. (2007, July). Forecasting of software development work effort: Evidence on expert judgement and formal models. International Journal of Forecasting, 23(3), 449–462. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2007.05.008>
9. Plebankiewicz, E., Juszczak, M., & Malara, J. (2015, September 1). Estimation Of Task Completion Times With The Use Of The PERT Method On The Example Of A Real Construction Project. Archives of Civil Engineering, 61(3), 51–62. <https://doi.org/10.1515/ace-2015-0024>
10. Mohamed, M., Abdel-Basset, M., Hussien, A., & Smarandache, F. (2016). Using Neutrosophic Sets to Obtain PERT Three-Times Estimates in Project Management. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/318673213_Using_Neutrosophic_Sets_to_Obtain_PERT_Three-Times_Estimates_in_Project_Management
11. Ba'its, H. A., Puspita, I. A., & Bay, A. F. (2020). Combination of program evaluation and review technique (PERT) and critical path method (CPM) for project schedule development. International Journal of Integrated Engineering, 12(3), 68–75.
12. University of Arizona. Standard normal distribution: Z score. Retrieved June 23, 2023, from <https://www.math.arizona.edu/~rsims/ma464/standardnormaltable.pdf>

УДК 004

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.2.10>

Дарина ЧЕРНИШОВА

здобувач PhD, асистент кафедри інженерії програмного забезпечення та кібербезпеки, Державний торговельно-економічний університет, вул. Кіото, 19, Київ, Україна, індекс 02000 (d.chernyshova@knu.edu.ua)

ORCID: 0000-0002-2914-8020

Daryna CHERNYSHOVA

Assistant Professor at Department of Software Engineering and Cybersecurity, State University of Trade and Economics, 19 Kyoto street, Kyiv, Ukraine, postal code 02000 (d.chernyshova@knu.edu.ua)

Бібліографічний опис статті: Чернишова, Д. Сутність та структура гендерної рівності в освітній діяльності. *Інформаційні технології та суспільство*. 2023. Вип. 2(8). 84–89. DOI: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.2.10>

Bibliographic description of the article: Chernyshova, D. (2023). Sutnist ta struktura hendernoi rivnosti v osvitnii diialnosti [The essence and structure of gender equality in educational activities]. *Informatsiini tekhnolohii ta suspilstvo – Information technology and society*, 2(8), 84–89. DOI: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.2.10>

ПОТРЕБА ЦИФРОВІЗАЦІЇ ПОЛІТИК ГЕНДЕРНОЇ РІВНОСТІ В ОСВІТНІЙ ДІЯЛЬНОСТІ

Розглядаються сутність та структуру гендерної рівності в освітній діяльності. Досліджується поняття гендерної рівності і її значення для освітнього процесу. Стаття описує структуру гендерної рівності, включаючи інтеграцію гендерної рівності в навчальні програми, підтримку гендерної рівності на рівнях шкільного середовища та професійний розвиток вчителів і вихователів, наголошує на важливості реалізації гендерної рівності в освіті для створення справедливого, рівноправного та інклюзивного навчального середовища. Важливість потреби проектування, моделювання та впровадження інформаційно-аналітичної системи моніторингу гендерної рівності в освітній діяльності. **Метою статті** є дослідження та пояснення сутності та структури гендерної рівності в освітній діяльності, а також сприяння формуванню цифрового справедливого та інклюзивного освітнього середовища для всіх учасників освітнього процесу. Реалізація поставленої мети передбачає проведення аналізу та дослідження гендерної рівності в освітній діяльності, що сприятиме підвищенню розуміння та практичної реалізації гендерної рівності в освіті та подальшій розробці інформаційно-аналітичної системи моніторингу гендерної рівності в освітній діяльності. **Наукова новизна** статті полягає у представленні оновленого аналізу та дослідження гендерної рівності в освітній діяльності на основі актуальних даних та наукових досліджень. Стаття наводить нові аргументи, які підтверджують важливість гендерної рівності в освітньому контексті. Наукова новизна статті полягає в її внеску до розуміння гендерної рівності в освіті та пропозиції нових ідей або рішень для подолання викликів у цій галузі, що можливі за рахунок автоматизації процесу моніторингу гендерної рівності в освітній діяльності. **Висновки.** Гендерна рівність в освіті є важливою для забезпечення справедливості та рівноправ'я всіх учасників освітнього процесу. Інтеграція гендерної рівності в навчальні програми та матеріали сприяє формуванню свідомого розуміння гендерних питань серед студентів. Уникнення стереотипів та дискримінації є ключовим аспектом гендерної рівності в освіті. Це сприяє створенню інклюзивного та сприятливого навчального середовища для всіх. Важливою складовою гендерної рівності в освіті є підтримка самовизначення, повага до різних гендерних ідентичностей та надання підтримки для їхнього самовираження. Створення політик та протоколів протидії дискримінації, розбудова інклюзивних класних колективів та розвиток навичок вчителів та викладачів щодо підтримки гендерної рівності є важливими стратегіями для підтримки гендерної рівності на рівнях освітнього середовища. Все вище зазначене призводить до необхідності розробки інформаційно-аналітичної системи моніторингу гендерної рівності в освітній діяльності.

Ключові слова: гендерна рівність, освітня діяльність, навчальні програми, професійний розвиток, дискримінація, інклюзивність, інформаційно-аналітична система моніторингу гендерної рівності в освітній діяльності.

THE ESSENCE AND STRUCTURE OF GENDER EQUALITY IN EDUCATIONAL ACTIVITIES

The essence and structure of gender equality in educational activities are examined. The concept of gender equality and its significance for the educational process are explored. The article describes the structure of gender equality, including the integration of gender equality into educational programs, support for gender equality at the school level, and the professional development of teachers and educators. Emphasis is placed on the importance of implementing gender equality in education to create a fair, equitable, and inclusive learning environment. The importance of the need for designing, modeling and implementing an information-analytical system for monitoring gender equality in educational activities. **The aim** of the article is to research and explain the essence and structure of gender equality in educational activities, as well as to promote the creation of a digital fair and inclusive educational environment for all participants in the educational process. Achieving this goal involves conducting an analysis and investigation of gender equality in educational activities, which will contribute

to enhancing understanding and practical implementation of gender equality in education and further development of the information and analytical system for monitoring gender equality in educational activities. **The scientific novelty** of the article lies in presenting an updated analysis and investigation of gender equality in educational activities based on current data and scientific research. The article introduces new arguments that confirm the importance of gender equality in the educational context. The scientific novelty of the article lies in its contribution to the understanding of gender equality in education and proposing new ideas or solutions to overcome challenges in this field, which are possible due to the automation of the process of monitoring gender equality in educational activities. **Conclusions.** Gender equality in education is important for ensuring justice and equal rights for all participants in the educational process. Integrating gender equality into curriculum and materials promotes a conscious understanding of gender issues among students. Avoiding stereotypes and discrimination is a key aspect of gender equality in education, which contributes to creating an inclusive and supportive learning environment for all students. Supporting students' self-determination, respecting different gender identities, and providing support for their self-expression are important components of gender equality in education. Creating policies and protocols to combat discrimination, building inclusive classroom communities, and developing teachers' skills in supporting gender equality are crucial strategies for promoting gender equality in school environments. All of the above leads to the need to develop an information and analytical system for monitoring gender equality in educational activities.

Key words: gender equality, educational activities, curriculum, professional development, discrimination, inclusivity, information and analytical system for monitoring gender equality in educational activities.

Актуальність. Актуальність теми щодо сутності та структури гендерної рівності в освітній діяльності проявляється у декількох аспектах. По-перше, суспільна свідомість зростає щодо значення рівноправ'я та поваги до гендерних різниць. Вивчення гендерної рівності в освіті сприяє свідомому розвитку суспільства. По-друге, сутність та структура гендерної рівності стикається з важливими проблемами, такими як стереотипи, дискримінація та нерівність в освіті, і пропонує стратегії для їх подолання та досягнення гендерної рівності. По-третє, тема гендерної рівності оновлює підходи до інтеграції гендерної рівності в освітній процес, що сприяє ефективному навчанню та розвитку усіх, незалежно від статевої приналежності або гендерної ідентичності [1-2, 4]. Крім того, актуальність теми впливає з зростаючої уваги до інклюзивності та розуміння різноманіття гендерів, а також з політичного та законодавчого контексту, де розробка політик і стратегій спрямована на досягнення гендерної рівності в освіті. Отже, тема є актуальною в контексті вимог і потреб суспільства, освіти, політики та законодавства щодо рівності та інклюзивності в освітньому середовищі. Враховуючи стратегію цифровізації освіти дане дослідження є основою для подальшої розробки інформаційно-аналітичної системи моніторингу гендерної рівності в освітній діяльності.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. На основі загальних тенденцій і попереднього досвіду можна зазначити деякі загальні напрями та висновки з досліджень гендерної рівності в освіті. Дослідження показують зростаюче розуміння та усвідомлення важливості гендерної рівності в освітньому контексті. Це відображається у зростаючій кількості досліджень та публікацій, присвячених цій темі [1-5]. Дослідження підкреслюють важливість включення гендерних питань у навчальні програми та матеріали. Це може включати перегляд і оновлення навчальних матеріалів, щоб відображати різноманітність гендерів та уникати стереотипів та дискримінації [3, 5, 7, 8-9]. Останні дослідження акцентують значення створення безпечного та інклюзивного навчального середовища для всіх учасників освітнього процесу, незалежно від їхньої статевої приналежності чи гендерної ідентичності. Це включає розбудову інклюзивних класних колективів та підтримку самовизначення [8]. Дослідження підтверджують важливість професійного розвитку вчителів з питань гендерної рівності. Це включає навчання вчителів щодо гендерних питань, розвиток навичок підтримки рівності та використання інклюзивних педагогічних практик [5, 7-9]. Дослідження свідчать про те, що реалізація гендерної рівності в освіті сприяє покращенню якості освіти та сприяє суспільному розвитку. Це може включати економічний розвиток, боротьбу зі стереотипами та побудову справедливого суспільства [7-9].

Варто зазначити, що є слабоструктуровані дослідження у сфері розробки інформаційно-аналітичних систем моніторингу в освітній діяльності [10-12], але за саме спрямовані на моніторинг гендерної рівності в освітній діяльності є малодослідженими.

Загальні тенденції у дослідженнях гендерної рівності в освіті наголошують на важливості впровадження політик, стратегій та практик, спрямованих на досягнення гендерної рівності та побудову інклюзивного освітнього середовища. Ці дослідження підкреслюють потребу у подальшій розробці інформаційно-аналітичної системи моніторингу гендерної рівності в освітній діяльності.

Метою дослідження є вивчення, аналіз та розуміння різних аспектів гендерної рівності в освітній діяльності та потребу в розробці інформаційно-аналітичної системи моніторингу гендерної рівності в освітній діяльності.

Виклад основного матеріалу. Гендерна рівність в освітній діяльності означає створення рівних можливостей та рівних умов для навчання та розвитку незалежно від гендерної приналежності. Її сутність полягає в тому, щоб усунути статева дискримінацію, стереотипи і нерівноправне ставлення до чоловіків і жінок у навчальному середовищі. Гендерна рівність в освітній діяльності має сутність, що

охоплює різні аспекти. Основні з них включають рівні можливостей та умови навчання, інклюзивну освіту та підтримку самовизначення здобувачів освіти [1, 2].

Гендерна рівність в освіті передбачає забезпечення рівних можливостей для хлопців і дівчат в доступі до освіти, виборі навчальних програм, дисциплін і професій. Вона пропонує усунення стереотипів, які можуть обмежувати вибір гендерно нейтральних професій, та сприяє стимулюванню рівного доступу до ресурсів, можливостей для самовираження та розвитку. Це означає, що кожен здобувач освіти має мати рівні шанси отримати якісну освіту та доступ до всіх освітніх можливостей [3-6].

Також гендерна рівність передбачає забезпечення рівного ставлення до учасників освітнього процесу, незалежно від їхньої статі. Вона включає в себе використання гендерно чутливих педагогічних підходів, матеріалів та методик, які враховують інтереси та потреби учасників освітнього процесу різних статей. Вона спрямована на те, щоб усунути нерівноправне ставлення до чоловіків та жінок, уніфікувати гендерні стереотипи в навчальних програмах, матеріалах та методиках і забезпечити рівні умови для всіх. Вчителі/викладачі повинні уникати статевих стереотипів у своїй роботі, поширювати гендерну освіту і сприяти розвитку навичок гендерної рівності серед здобувачів освіти. Гендерна рівність в освіті також означає підтримку самовизначення учасників освітнього процесу щодо їх гендерної ідентичності. Це включає повагу до самовизначення здобувачів освіти, використання правильної мови та прізвища у відповідності до їхньої ідентичності, а також забезпечення підтримки та ресурсів для студентів, які шукають допомогу або консультацію у зв'язку з питаннями гендерної ідентичності.

Гендерна рівність також відноситься до професійного розвитку педагогічних працівників. Вона включає в себе забезпечення рівних можливостей для жінок і чоловіків у плануванні кар'єрного росту, надання професійного навчання з питань гендерної рівності та підтримку рівних заробітних плат. Гендерна рівність передбачає створення безпечного і сприятливого класного середовища, де здобувачі освіти відчуються комфортно незалежно від своєї статі. Це включає боротьбу з будь-якими формами гендерного насильства, запобігання булінгу, заохочення співпраці і рівноправного взаємодії між хлопцями і дівчатами.

Загальна мета гендерної рівності в освіті полягає в тому, щоб створити справедливе, інклюзивне і рівноправне освітнє середовище для всіх здобувачів освіти, незалежно від їхньої статевої приналежності. Це сприяє розвитку толерантного суспільства, де гендерні різниці не впливають на можливості людей досягти свого повного потенціалу.

Структура гендерної рівності в освітній діяльності може бути різною, але одним із ключових аспектів є інтеграція гендерної рівності в навчальні програми. Це означає урахування гендерних аспектів у плануванні, розробці та реалізації навчальних матеріалів та курсів.

Елементів, які можуть бути враховані при інтеграції гендерної рівності в освітніх компонентах [2, 4, 6]:

1. Аналіз гендерного виміру: першим кроком є проведення аналізу гендерного виміру освітніх компонентів. Це означає визначення, які гендерні аспекти (наприклад, ролі, стереотипи, соціальні норми) можуть бути присутні в навчальних матеріалах і як вони можуть впливати на здобувачів освіти. Аналіз гендерного виміру допомагає виявити можливі нерівності та визначити шляхи для їх усунення.

2. Включення гендерно чутливих прикладів та матеріалів: можуть бути використані гендерно чутливі приклади, історії та матеріали, які відображають різні гендери, ролі та досвіди. Це допомагає здобувачам освіти розуміти, що гендерне розмаїття є нормою та що існує безліч можливостей для гендерної самовираженості.

3. Застосування гендерно чутливих методик навчання: педагогічні працівники можуть використовувати гендерно чутливі методики навчання, що враховують різницю в потребах та інтересах здобувачів освіти різних гендерів. Це може включати групову роботу, рольові ігри, дискусії та проектну роботу, які стимулюють активну участь здобувачів освіти та розвиток навичок гендерної рівності.

4. Підтримка критичного мислення сприятиме розвитку критичного мислення стосовно гендерних питань. Здобувачі освіти повинні мати можливість аналізувати стереотипи, нерівності та соціальні норми, пов'язані з гендером, та розуміти їхні наслідки для суспільства. Це допомагає здобувачам освіти стати свідомими гендерними громадянами та агентами змін.

5. Професійний розвиток педагогічних працівників: важливим елементом інтеграції гендерної рівності в навчальні програми є професійний розвиток. Вони повинні отримати навички та знання щодо гендерної рівності, щоб впроваджувати її принципи в навчальний процес. Це може включати тренінги, семінари, конференції та обмін досвідом щодо гендерної рівності в освіті. Інтеграція гендерної рівності в навчальні програми допомагає створити гендерно чутливе та справедливе освітнє середовище. Вона сприяє розширенню світогляду учасників освітнього процесу, формуванню рівних можливостей та підготовці молодого покоління до життя у різноманітному і глобалізованому світі.

6. Інформаційно-аналітичні системи моніторингу гендерної рівності: збирати, аналізувати, представляти та формувати структуровані дані про стан гендерної рівності в освітній діяльності, її якості та результатів.

Ці заходи сприяють інтеграції гендерної рівності в освітню діяльність та навчальний процес. Вони допомагають створити гендерно чутливі навчальні матеріали та включити гендерні питання у навчальні предмети. Це розширює світогляд учасників освітнього процесу, підтримує їхнє розуміння гендерної рівності та сприяє формуванню справедливого і більш інклюзивного освітнього середовища.

Підтримка гендерної рівності на різних рівнях освіти має важливе значення для створення справедливого та інклюзивного освітнього середовища. Закладам освіти слід мати політику, яка забороняє дискримінацію на основі гендерної приналежності. Це повинно бути супроводжене розробкою протоколів для реагування на ситуації дискримінації та встановлення відповідних механізмів скарг і врегулювання конфліктів. Політика повинна бути широко відомою учасникам освітнього процесу, і має бути активно впроваджена. Це включає уникнення гендерних стереотипів, надання рівних можливостей для всіх учасників освітнього процесу, використання різноманітних матеріалів та методик, що враховують гендерні аспекти, та сприяння гендерній самосвідомості учасників освітнього процесу. Важливим аспектом підтримки гендерної рівності є соціальне та емоційне навчання, яке сприяє розвитку навичок співробітництва, емпатії, розуміння різниці та поваги до інших. Ці підходи допомагають створити освітнє середовище, де гендерна рівність підтримується та просувається. Заклади освіти можуть стати місцем, де здобувачі навчаються і розуміють значення гендерної рівності, розширюють світогляд та готуються до життя в різноманітному світі [8-9].

Професійний розвиток підтримує розвиток навичок, знань та свідомості, що допомагають педагогічним працівникам ефективно працювати з різноманітністю здобувачів та створювати сприятливі умови для розкриття потенціалу кожного, незалежно від його гендерної приналежності.

Подолання нерівності в освітньому середовищі є важливою метою для створення справедливого та інклюзивного навчального середовища. Одна з основних стратегій – це забезпечення рівних можливостей для всіх учасників освітнього процесу та моніторинг даних показників серед закладів освіти. Це означає забезпечення доступу до якісної освіти, ресурсів та підтримки для всіх учасників освітнього процесу незалежно від їхньої статевої приналежності, етнічного походження, соціального статусу тощо. Рівні можливості повинні стосуватися навчання, участі в активностях та здобуття успіху [5, 8]. Можуть бути розроблені адаптовані програми та методики навчання, щоб відповідати різним потребам та стилям навчання. Це включає використання різноманітних педагогічних підходів, диференціювання завдань та оцінювання, а також використання технологій для підтримки навчання [3, 9]. Важливим етапом є процес автоматизації аналізу та моніторингу, тобто розробки інформаційно-аналітичних систем моніторингу стану гендерної рівності, що надасть можливість формувати якісні рекомендації щодо підвищення рівня залученості учасників освітнього процесу в питаннях гендерної рівності. Ці стратегії можуть бути використані для подолання нерівності в освітньому середовищі та створення справедливого та інклюзивного навчання для всіх учасників освітнього процесу. Вони сприяють побудові рівноправного та демократичного суспільства, де кожен учень має рівні можливості для розвитку та досягнення успіху.

Освіта відіграє важливу роль у формуванні гендерно-рівних цінностей у суспільстві [3-6]. Шляхом надання знань, розуміння та свідомості щодо гендерної рівності, освіта може сприяти зміні стереотипів, норм та уявлень про гендерну рівність у суспільстві. Ролі освіти у формуванні гендерно-рівних цінностей включають: усвідомлення гендерних нерівностей, формування розуміння гендеру як соціальної конструкції, розвиток критичного мислення, стимулювання емпатії та розуміння, сприяння розвитку гендерно-рівних навичок. Освіта допомагає учням усвідомити існування гендерних нерівностей у суспільстві, таких як стереотипи, дискримінація та соціокультурні обмеження.

Освіта сприяє розвитку емпатії та розуміння здобувачами освіти гендерних досвідів та перспектив інших людей. Шляхом вивчення історій успіху жінок, чоловіків та осіб з різними гендерними ідентичностями, освіта допомагає побачити різноманітність та цінність різних гендерів. Освіта може допомогти розвивати навички, які сприяють гендерній рівності, такі як співробітництво, емпатія, взаємовиручка та повага. Це може бути досягнуто через використання активних методів навчання, групових проєктів, рольових ігор та спільного вирішення гендерних проблем.

Загалом, освіта грає важливу роль у формуванні гендерно-рівних цінностей у суспільстві. Вона сприяє розумінню гендерних нерівностей, розвитку критичного мислення та емпатії, а також стимулює розвиток навичок, необхідних для побудови справедливого та рівноправного суспільства.

Проаналізувавши сутність та структуру гендерної рівності в освітній діяльності можемо зазначити потребу в проєктуванні, моделюванні та впровадженні інформаційно-аналітичної системи моніторин-

гу стану гендерної рівності в освітній діяльності, а також визначенні її структурних складових, що дозволить гармонізувати процес управління освітнім процесом.

Висновки. Отже, гендерна рівність в освіті означає забезпечення рівних можливостей, доступу та прав для всіх учасників освітнього процесу, незалежно від їхньої статевої приналежності чи гендерної ідентичності. Основні аспекти гендерної рівності в освіті включають: забезпечення рівних прав для всіх, включаючи право на освіту, доступ до ресурсів та можливостей для розвитку; уникнення стереотипів та дискримінації, що забороняє будь-яку форму нерівного поводження чи обмеження на основі гендеру; створення інклюзивного освітнього середовища, яке сприяє рівності та повазі до різних гендерних ідентичностей; підтримка самовизначення, гендерних прав та свободи обирати та виражати свою гендерну ідентичність; інтеграція гендерної рівності в навчальні програми, матеріали та методи навчання з метою підвищення свідомості та розуміння гендерних питань.

Отже, реалізація гендерної рівності в освіті не тільки забезпечує справедливість та рівноправ'я, але й має важливе значення для розвитку суспільства, підтримки економічного зростання та формування гармонійних стосунків.

А подальше проектування інформаційно-аналітичної системи моніторингу гендерної рівності в освіті може стати ефективним інструментом для підтримки розробки політик на основі фактичних даних, сприяння підзвітності та прозорості та покращення гендерної рівності в освіті.

Список використаних джерел:

1. Гендерна рівність і розвиток: погляд у контексті європейської стратегії України: гендер. вимір сімейн. політики; принцип гендер. рівності в екон. сфері; питання гендер. рівності у стратегіях міжнар. та європ. інституцій; прав. регулювання рівних прав та можливостей в Україні; моніторинг досягнення гендер. рівності у глоб. рейтингах; гендер. рівність очима громадян. Центр Разумкова ; [керівник проекту О. Пищуліна ; ред. А. Чернова]. Київ : Заповіт, 2016. – 244 с.
2. Власенко Н. С. Гендерна статистика для моніторингу досягнення рівності жінок і чоловіків: Україна ; Державний комітет статистики України, Проект "Сприяння гендерній рівності" ПРООН. К. : Інститут держави і права ім. В.М. Корецького НАН України, 2000. 54 с.
3. Пасічник Н. О. Формування умінь оперувати статистичними показниками гендерної рівності у майбутніх фахівців з освітніх вимірювань / Н. О. Пасічник, Р. Я. Різняк. Наук. зап. [Кіровоград. держ. пед. ун-ту ім. Володимира Винниченка]. Сер. Проблеми методики фізико-математичної і технологічної освіти. 2017. Вип. 12(2). С. 23-31.
4. Ярош О. Моніторинг виборів як чинник демократичного розвитку українського суспільства: гендерний аспект. Наук. зап. Ін-ту політ. і етнонаціональн. досліджень ім. І. Ф. Кураса НАН України. 2016. Вип. 3-4. С. 313-323.
5. Моніторинг системи освітнього менеджменту за моделями оцінки гендерної зрілості (на прикладі університетів України) / Г. Г. Фесенко, А. В. Шахов, Т. Г. Фесенко, А. В. Якунін. Вісн. Нац. технічн. ун-ту "ХПІ". Сер. Стратегічне управління, управління портфелями, програмами та проектами. – 2020. – № 1. – С. 68-77.
6. Фесенко Т. Г. Гендерний індекс освіти як контекст інноваційних проектів в Україні. Г. Фесенко. URL : http://eprints.kname.edu.ua/45529/1/%D0%9E%D0%9D%D0%9C%D0%A3_%D0%BD%D0%B0%D1%88%D1%96%20%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B5%D1%80_2017.pdf.
7. Гриценчук О. О. Гендерний підхід у моніторингових дослідженнях ІК-компетентності учасників освітнього процесу в освітній практиці країн Європи / О. О. Гриценчук. Інформ. технології і засоби навчання. 2013. Т. 37, Вип. 5.
8. Гендерні дослідження : прикладні аспекти : монографія / В. П. Кравець, Т.В. Говорун, О. М. Кікінежді та ін. ; за наук. ред. В. П. Кравця. Тернопіль : Навчальна книга – Богдан, 2013. 448 с.
9. Головашенко І.О. Гендерний підхід в системі освіти: узгодження національного досвіду з міжнародними стандартами. Режим доступу: www.gender.univer.kharkov.ua.
10. Інформаційно-аналітичне управління освітніми системами: методичний посібник / Т.В. Волкова, Н.О. Величко, І.В. Гириловська, Д.О. Закатнов, та інші за ред. Т.В. Волкової. К.: Педагогічна думка, 2012. 176 с.
11. Fesenko, Tetiana & Kovalenko, Andriy & Tkachov, Vitalii & Fesenko, Galyna & Yeroshenko, Olha. (2022). Information and analytical support of gender audit of educational management system. Bulletin of NTU KhPI Series Strategic Management Portfolio Program and Project Management. 70-79. 10.20998/2413-3000.2022.5.9.
12. Baranenko, Roman & Sokol, H. & Pustovoitov, P. & Zakharov, R. (2023). Information and analytical support of the education quality management system. Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. 2. 39-41. 10.26906/SUNZ.2023.2.039.

References:

1. Henderna rivnist i rozvytok: pohliad u konteksti yevropeiskoi stratehii Ukrainy: hender. vymir simein. polityky; pryntsyp hender. rivnosti v ekon. sferi; pytannia hender. rivnosti u stratehiakh mizhnar. ta yevrop. instytutsii; prav. rehuliuвання рівних прав та можливостей в Україні; monitorynh dosiahnennia hender. rivnosti u hlob. reitynhakh; hender. rivnist ochyma hromadian [Gender equality and development: a view in the context of the European strategy of Ukraine: gender. dimension of family politicians; gender principle. equality in the economy field; gender issue. equality in international strategies and European institutions; rights regulation of equal rights and opportunities in Ukraine; gender achievement monitoring. equality in glob. ratings; gender equality through the eyes of citizens] / *Tsentr Razumkova – Razumkov Centre*; [kerivnyk proektu O. Pyshchulina ; red. A. Chernova]. Kyiv : Zapovit, 2016. p. 244 [in Ukrainian]

2. Vlasenko N. S. et al. (2000) Henderna statystyka dlia monitorynhu dosiahnennia ravnosti zhynok i cholovikiv: Ukraina [Gender statistics for monitoring the progress of equality between women and men: Ukraine] *Derzhavnyi komitet statystyky Ukrainy, Proekt "Spryannia hendernii ravnosti" PROON*. – K. : Instytut derzhavy i prava im. V.M. Koretskoho NAN Ukrainy – State Statistics Committee of Ukraine, UNDP Project "Promoting Gender Equality". – K.: Institute of State and Law named after V.M. Koretskyi, National Academy of Sciences of Ukraine, 54 p. [in Ukrainian]
3. Pasichnyk N. O., Rizhniak Ya. (2017) Formuvannia umin operuvaty statystychnymy pokaznykamy hendernoi ravnosti u maibutnikh fakhivtsiv z osvitykh vymiriuvan [Formation of skills to operate with statistical indicators of gender equality in future specialists in educational measurement]. *Nauk. zap. [Kirovohrad. derzh. ped. un-tu im. Volodymyra Vynnychenka]. Ser. Problemy metodyky fizyko-matematychnoi i tekhnolohichnoi osvity* – Science works Kirovohrad State Pedagogical University named after Volodymyr Vinnichenko. Ser. Problems of the methodology of physical, mathematical and technological education. Vol. 12(2). – p. 23-31. [in Ukrainian]
4. Yarosh O. (2016) Monitorynh vyboriv yak chynnyk demokratychnoho rozvytku ukrainskoho suspilstva: hendernyi aspekt [Election monitoring as a factor of democratic development of Ukrainian society: gender aspect]. *Nauk. zap. In-tu polit. i etnonatsionaln. doslidzhen im. I. F. Kurasa NAN Ukrainy – Science work Institute of political and ethno-national research named after I. F. Krasa of the National Academy of Sciences of Ukraine*. Vol. 3-4. – p. 313-323. [in Ukrainian]
5. Fesenko H. H., Shakhov A. V., Fesenko T. H., Yakunin A. V. (2020) Monitorynh systemy osvithnoho menedzhmentu za modeliamy otsinky hendernoi zrilosti (na prykladi universytetiv Ukrainy) [Monitoring of the educational management system based on gender maturity assessment models (on the example of Ukrainian universities)]. *Visn. Nats. tekhnichn. un-tu "KhPI". Ser. Stratehichne upravlinnia, upravlinnia portfeliamy, prohramamy ta proektamy* – Bulletin of National technical KhPI University. Ser. Strategic management, management of portfolios, programs and projects. № 1. – p. 68-77. [in Ukrainian]
6. Fesenko T. H. Hendernyi indeks osvity yak kontekst innovatsiynykh proektiv v Ukraini [Gender index of education as a context of innovative projects in Ukraine] Retrieved from http://eprints.kname.edu.ua/45529/1/%D0%9E%D0%9D%D0%9C%D0%A3_%D0%BD%D0%B0%D1%88%D1%96%20%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B5%D1%80_2017.pdf. [in Ukrainian]
7. Hrytsenchuk O. O. (2013) Hendernyi pidkhyd u monitorynhovykh doslidzhenniakh IK-kompetentnosti uchniv v osvithnii praktytsi krain Yevropy [Gender approach in monitoring studies of IC competence of participants in the educational process in the educational practice of European countries]. *Inform. tekhnolohii i zasoby navchannia – Inform. technologies and means of education*. P. 37, vol. 5. [in Ukrainian]
8. Kravets V.P. et al. (2013) Genderni doslidzhennia [Gender studies] (Eds) V. P. Kravtsia. – Ternopil : *Navchalna knyha – Bohdan – Textbook – Bohdan*. – 448 p. [in Ukrainian]
9. Holovashenko I.O. Hendernyi pidkhyd v systemi osvity: uzghodzhennia natsionalnoho dosvidu z mizhnarodnymy standartamy [Gender approach in the education system: reconciliation of national experience with international standards]. Retrieved from www.gender.univer.kharkov.ua [in Ukrainian]
10. Volkova T.V., (Eds.) (2012) Informatsiyno-analitychne upravlinnya osvithnimy systemamy: metodychnyy posibnyk [Information and analytical management of educational systems: methodical manual]. – K.: *Pedahohichna dumka – Pedagogical thought*, 176 p. [in Ukrainian]
11. Fesenko, Tetiana & Kovalenko, Andriy & Tkachov, Vitalii & Fesenko, Galyna & Yeroshenko, Olha. (2022). Information and analytical support of gender audit of educational management system. *Bulletin of NTU KhPI Series Strategic Management Portfolio Program and Project Management*. 70-79. 10.20998/2413-3000.2022.5.9.
12. Baranenko, Roman & Sokol, H. & Pustovoitov, P. & Zakharov, R. (2023). Information and analytical support of the education quality management system. *Systemy upravlinnya, navhatsiyyi ta zv'yazku. Zbirnyk naukovykh prats' – Control, navigation and communication systems. Collection of scientific papers*. 2. 39-41. 10.26906/SUNZ.2023.2.039.

UDC 519.8

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.2.11>

Tatyana CHILIKINA

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Computer Science and Information Technology, Poltava University of Economics and Trade, Koval str., 3, Poltava, Ukraine, 36000 (tv.0502@gmail.com)

Tatyana PARFONOVA

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Computer Science and Information Technology, Poltava University of Economics and Trade, Koval str., 3, Poltava, Ukraine, 36000 (tapa.poltava@gmail.com)

Nina RUDENKO

Senior Lecturer at the Business Foreign Language Department, Poltava University of Economics and Trade, Koval str., 3, Poltava, Ukraine, 36000 (ninarudenko7@gmail.com)

Тетяна ЧІЛІКІНА

кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій, Полтавський університет економіки і торгівлі, вул. Ковалю, 3, Полтава, Україна, 36000 (tv.0502@gmail.com)

ORCID: 0000-0001-8234-9131

Тетяна ПАРФЬОНОВА

кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій, Полтавський університет економіки і торгівлі, вул. Ковалю, 3, Полтава, Україна, 36000 (tapa.poltava@gmail.com)

ORCID: 0000-0001-9343-2061

Ніна РУДЕНКО

старший викладач кафедри ділової іноземної мови, Полтавський університет економіки і торгівлі, вул. Ковалю, 3, м. Полтава, Україна, 36014 (ninarudenko7@gmail.com)

ORCID: 0000-0002-3603-8786

Bibliographic description of the article: Chilikina, T., Parfyonova, T., Rudenko, N. (2023). Ohliad prohramnoho zabezpechennia dlia rozv'iazannia zadach optymizatsii [Overview of software for solving optimization problems]. *Informatsiini tekhnolohii ta suspilstvo – Information technology and society*, 2(8), 90–96. DOI: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.2.11>

Бібліографічний опис статті: Чілікіна Т., Парфьонова Т., Руденко Н. Огляд програмного забезпечення для розв'язання задач оптимізації. *Інформаційні технології та суспільство*. 2023. Вип. 2(8). 90–96. DOI: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.2.11>

OVERVIEW OF SOFTWARE FOR SOLVING OPTIMIZATION PROBLEMS

A review of software products for solving optimization problems, an analysis of the capabilities of computer mathematics systems and spreadsheets has been carried out, a list of classes of optimization problems and optimization methods for their implementation has been indicated, the expediency of using computer mathematics systems in the educational process of the university has been investigated.

The purpose of the work is to review the existing modern software systems working with optimization problems, to specify the classes of problems and the optimization methods that are implemented.

Methodology. To obtain the results presented in the article, an analysis of modern software that implements optimization methods has been made.

Scientific novelty. The paper reviews the software that implements optimization methods, in particular, computer mathematics systems, which allow us to talk about its application for solving optimization problems of different classes and the feasibility of using it in the educational process.

Conclusions. Thanks to the review, the types of optimization problems have been identified, for the solution of which it is advisable to use existing software products, namely computer mathematics systems, for everyone interested in this topic.

Key words: optimization problems, computer mathematics systems, optimization methods.

ОГЛЯД ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ ОПТИМІЗАЦІЇ

Проведено огляд програмних продуктів для розв'язання задач оптимізації, здійснено аналіз можливостей систем комп'ютерної математики та електронних таблиць, зазначено перелік класів оптимізаційних задач та оптимізаційних методів, які їх реалізують, досліджено доцільність використання систем комп'ютерної математики в навчальному процесу ВНЗ.

Мета роботи – провести огляд існуючих сучасних програмних систем, які працюють з оптимізаційними задачами, зазначити класи задач та оптимізаційні методи, які реалізуються.

Методологія. Для отримання результатів наведених у статті було зроблено аналіз сучасного програмного забезпечення, яке реалізує методи оптимізації.

Наукова новизна. У роботі проведено огляд програмного забезпечення, яке реалізує методи оптимізації, зокрема, систем комп'ютерної математики, що дозволяє вести мову про його застосування для розв'язання оптимізаційних задач різних класів та доцільність використання в навчальному процесі.

Висновки. Завдяки проведеному огляду визначені типи задач оптимізації, для розв'язування яких доцільно використовувати існуючі програмні продукти, а саме, систем комп'ютерної математики, для всіх зацікавлених цією тематикою

Ключові слова: задачі оптимізації, системи комп'ютерної математики, оптимізаційні методи.

Statement of the problem in general terms and its connection with important scientific or practical problems. The search for software tools for solving optimization problems has always been one of the main stages of the modeling process, while the latter has been and remains dynamic.

New realities provide the emergence of new problems that require the involvement of the modeling process to solve. This leads to the development of the mathematical apparatus, in particular, the emergence of new classes of mathematical models and requires the expansion of software tools for their implementation. Creating your own software for each new problem, or at least writing a software implementation of the algorithm that implements it, is a rather voluminous and difficult process for specialists, so it is more expedient to consider using existing software products.

Most of them make it possible to successfully complete the modeling process by obtaining solutions, but they must meet certain criteria and adequately characterize the process or phenomenon under study in the form of obtained solutions. It is important to review the existing software for solving optimization problems, and determine the feasibility of its use in the educational process of the university.

Analysis of recent research and publications. The modern process of mathematical modeling is difficult to imagine and implement without computers. The rapid development of the IT sphere has created excellent conditions for the development of software of this level, available for use not only by experienced professionals, but also by the average user.

A large number of publications devoted to the use of existing software products, in particular, computer mathematics packages, for solving various problems that arise in various areas of application packages [2, 4-6, 24-25]

The widespread use of optimization models indicates the need to develop appropriate software and analyze the capabilities of existing software packages that implement known methods for solving optimization problems [1, 3, 9-10, 14, 15, 18-22, 28].

Setting objectives. Make an overview of modern software systems working on optimization problems, in particular, computer mathematics systems and data processing systems, analyze their capabilities for solving such problems.

Presentation of the main research material. In the modern world, all spheres of human activity, in one way or another, are associated with modeling processes, among which optimization models occupy a special place. As you know, modeling is the most effective way to study complex systems for various purposes – technical, economic, environmental, social, informational – both at the stage of their design and during operation, the latest methods and technologies for modeling are constantly emerging. Creating a model is a long, multi-stage and creative process that requires the researcher not only to have deep theoretical knowledge of various mathematical and technical disciplines, but also a creative approach to solving problems, the ability to generate certain heuristics that correspond to the deep essence of the object under study. Working not with the object itself (phenomenon, process), but with its model makes it possible to relatively quickly and painlessly investigate its basic properties and behavior in various possible situations. At the same time, computational (computer, simulation, simulation) experiments with object models make it possible to carefully and deeply study an object, which is not available in purely theoretical studies.

Consider the features of optimization modeling as one of the areas of applied mathematics, the subject of which is the problem of finding the extremum of a certain function under certain given conditions. A typical problem statement is as follows: a certain process can develop according to different options, each of which has

its own advantages and disadvantages, and, as a rule, there can be many such options. It is necessary to choose the best one from all possible options (directions)" [1, p. 11-13].

"In general terms, the problem of optimization modeling is formulated as follows: to find such values of variables at which the objective function acquires an extreme optimal value, i.e., the structure of the model must contain an optimized objective function and a set of constraints that determine the behavior of the process or the phenomenon being modeled. In the process of applying optimization modeling in economics, a clear statement of the problem and its formalization is the most difficult stage of the research, which requires thorough knowledge, first of all, of the essence of the phenomena or processes being modeled, and a successfully created optimization model can be further used to solve other unrelated problems to the initially simulated situation, for example, as in [30]. At the moment, a certain set of classical problem statements has been formed in optimization modeling, in particular, economic and mathematical models of which are widely used in practical studies of various problems [24, pp. 4-22].

After completing the modeling process, there is a search for methods and means of solving the use of modern information technologies. When a completely new problem is being investigated, for which the corresponding problem-oriented software has not yet been created, the traditional technology of solving practical problems using a computer is justified, for example, as in [16]. To solve more typical problems, it is more expedient to consider the use of existing software products, including computer mathematics packages [17, pp. 7-8].

Given the basic general requirements for software products that work with complex mathematical projects, it is necessary to take into account the features of solving optimization problems, taking into account the possibility of their application in the educational process of the university. Among these requirements, the following can be distinguished: the functionality of the software product (a list of classes of models of optimization problems that can be worked out); clear and accessible development interface, providing the ability to be applied by users with different levels of training; realizable diverse set of standard and special mathematical operations and functions; ensuring the adequacy of the solutions obtained (the ability to set the accuracy of calculations, the number of iterations, the possibility of deriving a step-by-step solution); the presence of powerful graphic tools; the ability to integrate into other environments; the ability to create reports in a convenient form); affordable cost or generally free application and so on.

Among the software tools that can be used to solve fairly wide classes of optimization problems, and which are the most accessible, the following can be distinguished: specialized optimization packages; computer mathematics systems; and spreadsheet editors. The first ones were developed by research institutes, and the created complexes and software systems worked with a very wide range of optimization problems.

In recent years, the use of computer equipment and information technologies for solving optimization problems has intensified due to the appearance of modern mathematical packages such as Maple, Matlab, Mathematica, Mathcad, etc. These systems meet the requirements listed above, while each of them has its own specific features.

Mathematical systems allow the user to work with a wide range of tasks, namely: conducting mathematical research that requires analytical transformations and numerical calculations; analysis and processing of experimental data; mathematical modeling and computer experiment; development of algorithms that implement numerous methods for solving problems, their analysis and use; visualization of research results, scientific and engineering graphics, creation of graphic and numerical reporting materials, etc.

Developers of mathematical packages in recent years have paid great attention to their integration and sharing. This significantly expands the class of problems that can be solved using each of the systems and allows you to choose the best and most adequate tools. Solving complex mathematical problems with the help of several software products significantly increases the likelihood of obtaining correct results, especially when the initial problem is incorrectly formulated [6].

Let us consider in more detail the capabilities of each of the modern mathematical software packages that have found their use from the average user, university students, in particular, to well-known research laboratories and institutes.

The most accessible to use is the Excel spreadsheet, which has a powerful "Search for Solutions" add-on, the ability to solve various linear programming problems using the simplex method with full output of simplex tables, as well as non-linear smooth programming problems using the generalized gradient method, and non-smooth programming problems using the evolutionary method. In addition, it is possible to set the accuracy of the obtained solutions, the number of iterations, the output of the results at each iteration. Each of these methods has its own specific settings, using which the user gets the optimal solution, taking into account the specifics of the real problem (solid solutions, error, etc.). In addition, for each obtained result, it is possible to create a report in three modes, as well as to save the scenario of the process of finding a solution.

The next powerful system is the Matlab package, one of the most popular mathematical packages, which has 50 sets of tools for numerical calculations, modeling and data analysis. Versions of the Matlab system (the last one was released in 2022) can function under most modern operating systems including Windows, Linux, UNIX, MacOS. A rich library of functions, divided into sections, each of which has a name that reflects its purpose. The Matlab system contains a significant set of extension packages (Toolbox) that enhance the mathematical capabilities of the system, increase the speed, efficiency and accuracy of calculations. Optimization Toolbox is an interesting optimization package – a library of functions that expand the capabilities of the Matlab system for numerical calculations and is intended for solving optimization problems and systems of nonlinear equations. It supports basic methods of optimization of functions of a number of variables: unconditional optimization of nonlinear functions; method of least squares; solution of nonlinear equations; linear programming; quadratic programming; conditional minimization of nonlinear functions; minimax methods; multicriteria optimization, in addition, Matlab also has powerful graphical capabilities for visualizing results and the ability to import and export data in ASCII, Binary, Lotus 1-2-3, Excel, Word, PowerPoint and built-in programming languages.

Mathematical package Maple is a representative of a new generation of software tools and is designed for engineering and mathematical calculations. The Maple package from the Canadian University of Waterloo is a computer mathematics system designed for the serious user. The system is able to perform quickly and efficiently not only symbolic, but also numerous calculations, and combining this with excellent means of graphic visualization and preparation of electronic documents, it has a powerful set of tools for solving optimization problems: the Simplex extension package for solving linear programming problems by the Simplex method and the Optimization package, which allows solving not only problems of linear, but also quadratic and nonlinear programming with an increased degree of visualization and preparation of electronic documents.

The MathCAD package is a mathematical editor that allows you to perform various scientific and engineering calculations, starting from elementary arithmetic and ending with complex implementations of numerical methods, performing symbolic calculations, and also has an excellent apparatus for calculating results, graphics of various types, powerful tools for preparing printed documents and Web – pages, the user interface being intuitive and similar to other Windows applications. This is the only system of computer mathematics in which the description of the algorithm for solving problems is carried out in a language similar to the usual mathematical language for describing mathematical problems, it is enough to simply enter mathematical expressions using the built-in formula editor, and immediately get the results. Basic user skills are enough to work effectively with the MathCAD editor. On the other hand, professional programmers can get much more out of MathCAD by creating their own software solutions, significantly expanded capabilities directly embedded in the system.

The MathCAD package has in its arsenal powerful tools for solving problems of linear and nonlinear optimization. The advantage is that the same functions Minimize, Maximize are used to solve different types of optimization problems, and the condition of the extremal problem is written in a form similar to the conventional notation in mathematics, while the user is given the opportunity to use both the keyboard and toolbars.

The Mathematica system. The new version of the system (2022) can run a wide range of operating systems. Among the wide range of possibilities of using the Mathematica system is the solution of conditional and unconditional optimization problems (in particular linear discrete and nonlinear programming problems), and the use of the Fuzzy Logic extension ensures the creation, modification and visualization of fuzzy sets, which are also used in optimization.

Sometimes, solving the problem in different mathematical systems, the results obtained do not coincide. This indicates that when solving real optimization problems, one should use various computer mathematics systems and carefully analyze the results obtained, especially for nonlinear programming problems. Let us briefly analyze the main capabilities of the computer mathematics systems Maple, Matlab, Mathematica, Mathcad for solving optimization problems, which are equipped with sufficiently powerful tools, either built into the core of these systems, or included in their composition in the form of additional modules (extension packages) and implement the most popular methods optimizations, in particular the golden section method and parabolas for one-dimensional optimization; simplex Nelder-Mild method, conjugate gradient method, quasi-Newtonian methods for multidimensional nonlinear optimization problems; interior point method (Karmarkar method) for solving high-dimensional linear programming problems, etc. Note that in these systems, as a rule, when solving specific problems, several optimization methods are implemented, which are applied depending on the dimension of the problem, the properties of the objective function, or the features that are present in the given constraints [6, p. 265].

Conclusions from the study and prospects for further research in this direction. Wide analytical, computational and graphical capabilities of modern mathematical systems make them one of the main tools in the professional activity of specialists in various fields. The conducted review proved that the areas of use of these packages largely overlap, therefore, to solve optimization problems, and not only, it is better to simultaneously

use parts of computer mathematics packages, taking into account spreadsheets. Perhaps it is better to start studying and using these systems with Mathcad, in which the condition of the problem is written simply and uses only two standard functions to find solutions to optimization problems.

This will ensure the adequacy of the obtained solutions, and, if necessary, the improvement of the model itself. Therefore, the use of modern computer mathematics packages in the curriculum is advisable, which will determine the high level of professional training of students, the level of their mathematical and information culture, and make future specialists competitive in the international labor market.

As promising areas of research, one can analyze a deeper comparative analysis of the capabilities of these systems by solving a certain list of various optimization problems.

Bibliography:

1. Волонтир Л.О, Потапова Н.А., Ушкаленко І.М., Чіков І.А. Оптимізаційні методи та моделі в підприємницькій діяльності: Навчальний посібник. Вінницький національний аграрний університет. Вінниця: ВНАУ. 2020. 404 с.
2. Голубева С. М., Морнева М. О. Порівняльна оцінка програмних пакетів комп'ютерного моделювання інженерних процесів *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2017. № 3. С. 44-47.
3. Григорків В.С., Григорків М.В., Ярошенко О.І. Оптимізаційні методи та моделі: підручник. Чернівці: Чернівецький нац. ун-т. 2022. 440 с.
4. Дем'яник І. В. Стилий опис пакетів розширення СКМ Maple для розв'язування задач лінійного програмування : матеріали XLIX наук.-тех. конференції підрозділів ВНТУ. Вінниця. 2020. Електрон. текст. дані. – 2020. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fitki/all-fitki-2020/paper/view/9351>.
5. Дрозденко В.О. Maple в математиці: навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів III та IV рівнів акредитації. Біла Церква. 2019. 328 с.
6. Жалдак М.І., Триус Ю.В. Основи теорії і методів оптимізації: Навчальний посібник. Черкаси: Брама-Україна. 2005. 608 с.
7. Захарчук В.І. Методи оптимізації та комп'ютерні технології: навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. Луцьк: РВВ Луцького НТУ. 2017. 144 с.
8. Злобін Г. Г. Системи комп'ютерної математики в наукових обчисленнях : навчальний посібник, Львівський національний університет імені Івана Франка. 2013. 120 с.
9. Інформаційні технології аналізу систем: лабораторний практикум для здобувачів освітнього ступеня бакалавр зі спеціальності 122 «Комп'ютерні науки» та 124 «Системний аналіз» / упоряд. Ю.В. Триус, І. В. Герасименко. Черкас. держ. технол. ун-т. Черкаси: ЧДТУ. 2018. 191 с.
10. Ішук А.А. Використання комп'ютера в процесі навчання розв'язування деяких задач оптимізації. Науковий часопис Національного педагогічного університету імені М. П. Драгоманова. Серія 2: Комп'ютерно-орієнтовані системи навчання, 2016. Вип. 18 (25). С. 127-139.
11. Ключко В. І. Застосування новітніх інформаційних технологій при вивченні вищої математики у технічному вузі: навч.-метод. посіб. Вінниця : ВДТУ. 1997. 300 с.
12. Кобильник Т.П., Когут У.П. Системи комп'ютерної математики у навчанні студентів напрямку підготовки «Інформатика». *Інформаційні технології і засоби навчання*. 2014. Том 40. № 2.
13. М. Є Босін, В. М. Русскін Комп'ютерна математика: практичний посібник. Комунальний заклад «Харківська гуманітарно-педагогічна академія» Харківської обласної ради. Харків, 2018. 110 с.
14. Комп'ютерне моделювання систем та процесів. Методи обчислень. Частина 1 : навчальний посібник / Р.Н. Кветний та ін. Вінниця: ВНТУ. 2012. 193 с.
15. Листопад В.В. Реалізація методу штучного базису для розв'язування екстремальних задач лінійного програмування засобами Microsoft Excel. Науковий часопис НПУ імені М.П. Драгоманова. Серія 2. *Комп'ютерно-орієнтовані системи навчання*: № 10 (17) (2010)
16. Ольховська, О. Черненко, О. Парфьонова, Т. Чілікіна (2022). Програмний комплекс для розв'язування евклідових комбінаторних оптимізаційних задач точними та наближеними методами. *Інформаційні технології та суспільство*, 2022. № 2. С. 13-22.
17. Стеценко, І.В. Моделювання систем : навч. посіб. Черкас. держ. технол. ун-т. Черкаси, 2010. 399 с. ISBN 978-966-402-073-9
18. Співаковський О. В. Теорія і практика використання інформаційних технологій у процесі підготовки студентів математичних спеціальностей: монографія. Херсон : Айлант, 2003. 228 с.
19. Триус Ю. В., Онищенко Б. О. Використання MATHCAD 2000 PROFESSIONAL для розв'язування задач оптимізації: матеріали міжнар. конференції, присвяченої 200-річчю з дня народження М. В. Остроградського, м.Полтава, 26-27 вересня 2001 р.). Полтава, 2001. С. 46-48.
20. Триус Ю. В. Розв'язування екстремальних задач за допомогою пакету Matlab 6.5. Науковий часопис НПУ ім. М. П. Драгоманова. Серія 2. *Комп'ютерно-орієнтовані системи навчання*: 2005. № 2(9). С. 61-79.
21. Триус Ю. В. Методика використання пакету Maple 7 для розв'язування екстремальних задач. *Теорія та методика навчання математики, фізики, інформатики*: Збірник наукових праць. Випуск V: В 3-х томах. Кривий Ріг: Видавничий відділ НМетАУ, 2005. Т. 1: Теорія та методика навчання математики. С. 282-296.
22. Триус Ю. В. Використання систем комп'ютерної математики при вивченні і розв'язуванні задач оптимізації. *Інформатика та комп'ютерна підтримка навчальних дисциплін у середній і вищій школі*: матеріали Всеукраїнської наук.-практ. конф., м. Бердянськ, 23-26 червня 2004 р. Бердянськ, 2004. С. 115-117.

23. Тютюник О.І. Використання систем комп'ютерної математики у процесі навчання лінійного програмування майбутніх менеджерів- адміністраторів: дис. ... канд. пед. наук : 13.00.10. Вінниця, 2014. 367 с.
24. Штельма О. М. Конспект лекцій з курсу «Оптимізаційні методи та моделі» (для студентів 2 курсу денної форми навчання освітнього рівня «бакалавр» спеціальності 122–Комп'ютерні науки). Харків: ХНУМГ ім. О. М. Беке-това. 2018. 38 с.
25. Юнчик В. Л., Федонюк А. А. Порівняльна характеристика функціональних можливостей систем комп'ютерної математики в процесі розв'язування задач. *Information system and networks*. 2019. С. 90–102.
26. Koliechikina L., Pichugina O., Chilikina T. Multicriteria combinatorial optimization model of an infocommunication system. International Conference "Problems of Infocommunications. Science and Technology" (PIC S&T'2021). P. 135-138.
27. Kvyetnyy R. Basics of Modelling and Computational Methods. Вінниця: ВДТУ, 2007. 147 с.
28. Venkataraman P.: Applied Optimization with Matlab Programming, John Wiley & Sons, New York 2001.

References:

1. Volontir L.O, Potapova N.A., Ushkalenko I.M., Chikov I.A. Optimizacijni metodi ta modeli v pidpriyemnickij diyalnosti [Optimization methods and models in business activity: Training manual]: Navchalnij posibnik. Vinnickij nacionalnij agrarnij universitet. Vinnicya: VNAU. 2020. 404 s [in Ukrainian].
2. Golubyeva S. M., Morneva M. O. Porivnyalna ocinka programnih paketiv komp'yuternogo modelyuvannya inzhenernih procesiv [Comparative evaluation of software packages for computer modeling of engineering processes]. Visnik Shidnoukrayinskogo nacionalnogo universitetu imeni Volodimira Dalya. 2017. № 3. S. 44-47 [in Ukrainian].
3. Grigorkiv V.S., Grigorkiv M.V., Yaroshenko O.I. Optimizacijni metodi ta modeli [Optimization methods and models]: pidruchnik. Chernivci: Cherniveckij nac. un-t. 2022. 440 s [in Ukrainian].
4. Dem'yanik I. V. Stislij opis paketiv rozshirennya SKM Maple dlya rozv'yazuvannya zadach liniynogo programuvannya [Brief description of Maple SCM extension packages for solving linear programming problems] [Elektronnij resurs] / I. V. Dem'yanik; nauk. ker. O. I. Tyutyunnik: materiali XLIX nauk.-teh. konferenciyi pidrozdiliv VNTU. Vinnicya. 2020. Elektron. tekst. dani. – 2020. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fitki/all-fitki-2020/paper/view/9351> [in Ukrainian].
5. Drozdenko V.O. Maple v matematiki: navchalnij posibnik dlya studentiv vishih navchalnih zakladiv III ta IV rivniv akreditaciyi [Maple in mathematics: a study guide for students of higher educational institutions of III and IV levels of accreditation]. Bila Cerkva. 2019. 328 s [in Ukrainian].
6. Zhaldak M.I., Trius Yu.V. Osnovi teorii i metodiv optimizaciyi [Basics of optimization theory and methods: Study guide]: Navchalnij posibnik. Cherkasi: Brama-Ukrayina. 2005. 608 s [in Ukrainian].
7. Zaharchuk V.I. Metodi optimizaciyi ta komp'yuterni tehnologiyi: navchalnij posibnik dlya studentiv vishih navchalnih zakladiv [Systems of computer mathematics in scientific calculations]. Luck: RVV Luckogo NTU. 2017. 144 s [in Ukrainian].
8. Zlobin G. G. Sistemi komp'yuternoyi matematiki v naukovih obchislenniyah [Systems of computer mathematics in scientific calculations]: navchalnij posibnik, Lvivskij nacionalnij universitet imeni Ivana Franka. 2013. 120 s [in Ukrainian].
9. Informacijni tehnologiyi analizu sistem: laboratornij praktikum dlya zdobuvachiv osvitnogo stupenya bakalavr zi specialnosti 122 «Komp'yuterni nauki» ta 124 «Sistemnij analiz» [Information technologies of systems analysis: laboratory practice for bachelor's degree holders in the specialty 122 "Computer science" and 124 "System analysis"] [Elektronnij resurs] / [uporyad. Yu.V. Trius, I. V. Gerasimenko] / Cherkas. derzh. tehnol. un-t. Cherkasi: ChDTU. 2018. 191 s [in Ukrainian].
10. Ishuk A.A. Viktoristannya komp'yutera v procesi navchannya rozv'yazuvannya deyakih zadach optimizaciyi [Using a computer in the learning process of solving some optimization problems]. Naukovij chasopis Nacionalnogo pedagogichnogo universitetu imeni M. P. Dragomanova. Seriya 2: Komp'yuterno-oriyentovani sistemi navchannya, 2016. Vip. 18 (25). S. 127-139 [in Ukrainian].
11. Klochko V. I. Zastosuvannya novitnih informacijnih tehnologij pri vivchenni vishoyi matematiki u tehničnomu vuzi [Application of the latest information technologies in the study of higher mathematics in a technical university]: navch.-metod. posib. Vinnicya : VDTU. 1997. 300 s [in Ukrainian].
12. Kobilnik T.P., Kogut U.P. Sistemi komp'yuternoyi matematiki u navchanni studentiv napryamku pidgotovki «Informatika» [Systems of computer mathematics in teaching students of the "Informatics" field of study]. Informacijni tehnologiyi i zasobi navchannya. 2014. Tom 40. № 2 [in Ukrainian].
13. M. Ye Bosin, V. M. Russkin Komp'yuterna matematika: praktichnij posibnik [Computer mathematics: a practical guide]. Komunalnij zaklad «Harkivska humanitarno-pedagogichna akademiya» Harkivskoyi oblasnoyi radi. Harkiv, 2018. 110 s [in Ukrainian].
14. Komp'yuterne modelyuvannya sistem ta procesiv. Metodi obchislen. Chastina 1 [Computer modeling of systems and processes. Calculation methods]: navchalnij posibnik / R.N. Kvyetnij ta in. Vinnicya: VNTU. 2012. 193 s [in Ukrainian].
15. Listopad V.V. Realizaciya metodu shtuchnogo bazisu dlya rozv'yazuvannya ekstremalnih zadach liniynogo programuvannya zasobami Microsoft Excel [Implementation of the artificial basis method for solving extreme problems of linear programming with Microsoft Excel]. Naukovij chasopis NPU imeni M.P. Dragomanova. Seriya 2. Komp'yuterno-oriyentovani sistemi navchannya: № 10 (17) (2010) [in Ukrainian].
16. Olhovska, O. Chernenko, O. Parfonova, T. Chilikina (2022). Programnij kompleks dlya rozv'yazuvannya evklidovih kombinatornih optimizacijnih zadach tochnimi ta nablizhenimi metodami [Software package for solving Euclidean combinatorial optimization problems with accurate and approximate methods]. Informacijni tehnologiyi ta suspilstvo, 2022. № 2. S.13-22. [in Ukrainian].
17. Stecenko, I.V. Modelyuvannya sistem [Modeling of systems] [Elektronnij resurs, tekst] : navch. posib. Cherkas. derzh. tehnol. un-t. Cherkasi, 2010. 399 s. ISBN 978-966-402-073-9 [in Ukrainian].

18. Spivakovskij O. V. Teoriya i praktika vikoristannya informacijnih tehnologij u procesi pidgotovki studentiv matematichnih specialnostej [Theory and practice of using information technologies in the process of training students of mathematical specialties]: monografiya. Herson : Ajlant, 2003. 228 s [in Ukrainian].
19. Trius Yu. V., Onishenko B. O. Vikoristannya MATHCAD 2000 PROFESSIONAL dlya rozv'yazuvannya zadach optimizaciyi [Use of MATHCAD 2000 PROFESSIONAL for solving optimization problems]: materiali mizhnar. konferenciyi, prisvyachenoyi 200-richchyu z dnya narodzhennya M. V. Ostrogradskogo, m.Poltava, 26–27 veresnya 2001 r.). Poltava, 2001. S. 46-48. [in Ukrainian].
20. Trius Yu. V. Rozv'yazuvannya ekstremalnih zadach za dopomogoyu paketu Matlab 6.5 [Solving extreme problems using the Matlab 6.5 package]. Naukovij chasopis NPU im. M. P. Dragomanova. Seriya 2. Komp'yuterno-oriyentovani sistemi navchannya: 2005. № 2(9). S. 61-79. [in Ukrainian].
21. Trius Yu. V. Metodika vikoristannya paketu Maple 7 dlya rozv'yazuvannya ekstremalnih zadach [Methodology for using the Maple 7 package for solving extreme problems]. Teoriya ta metodika navchannya matematiki, fiziki, informatiki: Zbirnik naukovih prac. Vipusk V: V 3-h tomah. Krivij Rig: Vidavnicij viddil NMetAU, 2005. T. 1: Teoriya ta metodika navchannya matematiki. S. 282-296 [in Ukrainian].
22. Trius Yu. V. Vikoristannya sistem komp'yuternoyi matematiki pri vivchenni i rozv'yazuvanni zadach optimizaciyi [The use of computer mathematics systems in studying and solving optimization problems]. Informatika ta komp'yuterna pidtrimka navchalnih disciplin u serednij i vishij shkoli: materiali Vseukrayinskoyi nauk.-prakt. konf., m. Berdyansk, 23–26 chervnya 2004 r. Berdyansk, 2004. S. 115-117 [in Ukrainian].
23. Tyutyunik O.I. Vikoristannya sistem komp'yuternoyi matematiki u procesi navchannya liniynogo programuvannya majbutnih menedzheriv- administratoriv [The use of computer mathematics systems in the process of teaching linear programming to future managers-administrators]: dis. ... kand. ped. nauk : 13.00.10. Vinnicya, 2014. 367 s [in Ukrainian].
24. Shtelma O. M. Konspekt lekcij z kursu «Optimizacijni metodi ta modeli» (dlya studentiv 2kursu dennoyi formi navchannya osvithnogo rivnya «bakalavr»specialnosti 122–Komp'yuterni nauki) [Lecture notes from the course "Optimization methods and models" (for students of the 2nd year of full-time education at the "bachelor" level, specialty 122 – Computer science). Harkiv: HNUMG im. O. M. Beketova. 2018. 38s [in Ukrainian].
25. Yunchik V. L., Fedonyuk A. A. Porivnyalna harakteristika funkcionalnih mozhливостей sistem komp'yuternoyi matematiki v procesi rozv'yazuvannya zadach [Comparative characteristics of functional capabilities of computer mathematics systems in the process of solving problems]. INFORMATION SYSTEMS AND NETWORKS. 2019. S. 90-102 [in Ukrainian].
26. Koliechkina L., Pichugina O., Chilikina T. Multicriteria combinatorial optimization model of an infocommunication system. International Conference "Problems of Infocommunications. Science and Technology" (PIC S&T'2021). P. 135-138.
27. Kvyetnyy R. Basics of Modelling and Computational Methods. Vinnicya: VDTU, 2007. 147 s.
28. Venkataraman P.: Applied Optimization with Matlab Programming, John Wiley & Sons, New York 2001.

НОТАТКИ

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ
ТА СУСПІЛЬСТВО**

**INFORMATION TECHNOLOGY
AND SOCIETY**

**ВИПУСК 2 (8)
ISSUE 2 (8)**

2023

Коректура
Ірина Чудеснова

Комп'ютерна верстка
Наталія Кузнєцова

Формат 60x84/8. Гарнітура Cambria.
Папір офсет. Цифровий друк. Ум. друк. арк. 11,39. Замов. № 0923/553. Наклад 300 прим.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»
65101, Україна, м. Одеса, вул. Інглєзі, 6/1
Телефон +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08
E-mail: mailbox@helvetica.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК No 7623 від 22.06.2022 р.